



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE MARTILLOS CON
TAMIZ INTERCAMBIABLE, PARA PULVERIZAR YESO CRUDO”**

TESIS DE GRADO

Previa la Obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

LUIS FERNANDO GUAYLLAS POMA

JOSÉ VICENTE MONTERO VARGAS

RIOBAMBA-ECUADOR

2012

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento sincero a nuestros padres, verdadero ejemplo de apostolado, figuras sublimes de notoria grandeza que con amor nos abrigaron, con pasión educaron y con valentía protegieron es gracias a su infinito amor que hoy cristalizamos un sueño más en esta vida que tan generosamente nos han dado.

A Riobamba y nuestra querida Politécnica de Chimborazo, que hoy es nuestra, gracias por recibirnos con los brazos abiertos, aquí vivimos penas pero también alegrías, hoy y siempre llevaremos grabado en el alma el orgullo de ser politécnicos y haber dejado una pequeña huella en tan grande institución.

A la Escuela de Ingeniería Química, donde formamos no solo nuestras mentes sino también nuestros corazones, queremos dejar perenne nuestro agradecimiento a los buenos docentes que fueron profesores y amigos en especial a: al Ing. César Avalos. Dr. Edmundo Caluña.

Un agradecimiento especial para el Ing. Mario Villacrés, entrañable amigo que trascendió más allá de sus funciones como Director de Tesis, gracias por tu apoyo incondicional.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a mis padres Javier y María, este trabajo es mío y vuestro, hoy vivo mi sueño gracias a su amor, cariño y confianza, a mi hermosa familia y a mi linda Loja porque esta sangre lojana es vivo sentimiento de cultura, ciencia, sentimiento y lucha. También dedico este presente a la memoria de Andrea Carolina Guerrero Sotomayor.

Luis Fernando

Con mucho cariño dedico este fruto de mi esfuerzo a mis padres José Vicente y Azucena, los cuales cultivaron en mí los valores que me hacen hoy la persona que soy, a ellos por los consejos, y el apoyo incondicional y por enseñarme el espíritu de perseverancia que me ayudaron a vencer los obstáculos que se presentaron a lo largo de la carrera politécnica. A mis hermanos Antonella, Fernando, Andrés y David hermanos a los cuales siempre los llevaré dentro de mi corazón.

José Vicente

Nombre	Firma	Fecha
Dra. Yolanda Díaz DECANA FAC.CIENCIAS
Ing. Mario Villacrés A. DIRECTOR ESC.ING.QUIMICA
Ing. Mario Villacrés A. DIRECTOR DE TESIS
Ing. José Usiña M. MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Ing. Hugo Calderón. MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Tec. Carlos Rodríguez DIRECTOR CENTRO DOCUMENTACIÓN

**“Nosotros, LUIS FERNANDO
GUAYLLAS POMA Y JOSÉ
VICENTE MONTERO VARGAS,**
autores de la siguiente tesis, somos
responsables de las ideas, doctrinas y
resultados expuestas en el siguiente
trabajo de investigación, siendo la
ESPOCH la dueña intelectual de la
misma.”

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$[\sigma_c]$	Resistencia a la compresión del martillo (kg/mm^2)
A	Masa de yeso que entra al sistema de molienda y tamizado (g)
A_c	Área sujeta a compresión (mm^2)
B	Masa de yeso que sale del sistema de molienda y tamizado (g)
$B_{u,n}$	Función de rotura para el tamiz n y u.
C_m	Constante del molino (kW.h/ton)
C	Masa de yeso que se retiene dentro del sistema (g)
d_m	Diámetro de abertura para el tren de martillo (cm)
dpa	Diámetro del 80% de la alimentación (mm).
dpb	Diámetro del 80% de la producto (mm).
d_{pmolino}	Diámetro de la polea del molino (mm)
d_{pmotor}	Diámetro de la polea del motor (mm)
e	Número de martillos
e_m	Espesor del martillo (cm)
e_{mt}	Eficiencia del proceso de molienda y tamizado combinado.
f	Factor dependiente de velocidad de rotación de los martillos
F_t	Fuerza de trituración del yeso
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
G	Peso del martillo en kg
h_m	Altura del martillo (cm)
l_c	Longitud de la carcasa del molino (cm)
l_m	Longitud del martillo (cm)
\dot{m}	Flujo másico (kg/h)
m_c	Masa de la carga (g)
m_p	Masa de producto que pasa a través del tamiz designado (kg).
M_t	Molturabilidad (kg/min).
n	Tamiz superior

n_c	Coeficiente de seguridad
$n_{el\acute{e}ct}$	Eficiencia el\u00e9ctrica del motor
$n_{mec\u00e1nica}$	Eficiencia mec\u00e1nica asumida
n_{sm}	Coeficiente de seguridad de los martillos
P_{motor}	Potencia del motor (W)
$P_{el\acute{e}ct}$	Potencia el\u00e9ctrica del motor en HP
P_m	Potencia del molino (kW)
r_c	Radio de la carcasa (cm)
r_m	Radio entre la punta del martillo y el centro del eje del molino (m).
S_n	Funcion de Velocidad de Molienda de tamiz n. (s^{-1})
S_u	Funcion de Velocidad de Molienda de tamiz u. (s^{-1})
t_m	Tiempo en que producto pasa por tamiz designado (min).
T_{motor}	Momento de torsi\u00f3n aplicado al molino (N.m)
u	Tamiz inferior
V_c	Volumen de la carga (cm ³)
v_m	Velocidad lineal del molino (rev/s)
v_{molino}	Velocidad de rotaci\u00f3n del molino (rpm).
v_{motor}	Velocidad de rotaci\u00f3n del motor (rpm).
$x_{n,t}$	Fracci\u00f3n de tamiz en el tamiz n en el tiempo 0.
$x_{n,t+1}$	Fracci\u00f3n de yeso en el tamiz n en el tiempo n+1.
W_i	Indice de trabajo relacionado con kb (kW.h/ton)
w_{ml}	Velocidad tangencial del molino (m/s).
σ_c	Esfuerzo de compresi\u00f3n (kg/mm ²)
ω_m	Velocidad angular de los martillos (rad/s)
ρ_{ay}	Densidad aparente del yeso (g/cm ³)

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
INTRODUCCIÓN.....	III
ANTECEDENTES.....	IV
JUSTIFICACIÓN	VI
CAPITULO I.....	1
1. MARCO TEORICO	1
1.1. YESO	1
1.1.1. GENERALIDADES	1
1.1.2. ORIGEN.....	2
1.1.3. ESTADO NATURAL.....	3
1.1.4. Proceso.....	6
1.1.5. USOS.....	10
1.2. REDUCCIÓN DE TAMAÑO:.....	11
1.2.1. MECÁNICA DE FRACTURA DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO	12
1.2.1.1. ESFUERZOS, DEFORMACIONES UNITARIAS Y ENERGÍA.	13
1.2.1.2. Resistencia cohesiva ideal, concentración de esfuerzos y la Teoría de Grietas de Griffith	16
1.2.1.2.1. Resistencia Cohesiva Ideal.....	16
1.2.1.2.2. Concentración de Esfuerzo: Teoría de Grietas de Griffith.....	17
1.3. Ecuaciones referentes al diseño de equipos de molienda.	19
1.3.1. MÉTODO DE BOND PARA EL DISEÑO DE MOLINOS	20
1.3.2. ENERGÍA PARA LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO:	22
1.3.2.1. LEY DE RITTINGER	24
1.3.2.2. LEY DE KICK	24

1.3.2.3.	LEY DE BOND E ÍNDICE DE TRABAJO.....	26
1.4.	SIMULACIÓN DE LAS OPERACIONES DE MOLIENDA:	27
1.5.	EQUIPOS INVOLUCRADOS EN LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO, CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN.....	28
1.5.1.	MOLINO DE MARTILLOS.....	33
1.6.	LA MOLTURABILIDAD.....	34
1.7.	CLASIFICACIÓN DE TAMAÑOS.	35
1.7.1.	TAMIZADO	37
1.7.1.1.	BALANCES DE MASAS APLICADOS A LOS TAMICES:	38
1.7.1.2.	EFICACIA DE UN TAMIZ.....	39
CAPITULO II.....		40
2.	PARTE EXPERIMENTAL.....	40
2.1.	MUESTREO.....	41
2.2.	METODOLOGÍA	41
2.2.1.	MÉTODOS Y TÉCNICAS	41
2.2.1.1.	MÉTODOS	41
2.2.1.1.1.	INDUCTIVO	42
2.2.1.1.2.	DEDUCTIVO	42
2.2.1.1.3.	EXPERIMENTAL.....	43
2.2.1.2.	Técnicas	43
2.2.1.2.1.	TECNICAS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	46
2.2.1.2.1.1.	TECNICAS PARA EL ANALISIS QUÍMICO DEL YESO	46
2.2.1.2.1.1.1.	DETERMINACIÓN DEL AGUA LIBRE.	46
2.2.1.2.1.1.2.	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA PARA DETERMINACIONES POSTERIORES. .	47
2.2.1.2.1.1.3.	DETERMINACIÓN DEL AGUA COMBINADA.	48
2.2.1.2.1.1.4.	DETERMINACIÓN DEL ANHÍDRIDO CARBÓNICO.	49
2.2.1.2.1.1.5.	DETERMINACIÓN DEL SÍLICE Y MATERIAS INSOLUBLES.....	50
2.2.1.2.1.1.6.	DETERMINACIÓN DEL ÓXIDO DE HIERO Y ALUMINIO.....	52
2.2.1.2.1.1.7.	DETERMINACIÓN DEL ÓXIDO DE CALCIO.....	53
2.2.1.2.1.1.8.	DETERMINACIÓN DEL ÓXIDO DE MAGNESIO	54
2.2.1.2.1.1.9.	DETERMINACIÓN DEL ANHÍDRIDO SULFÚRICO	55
2.2.1.2.1.1.10.	DETERMINACIÓN DEL CLORURO DE SODIO	56
2.3.	DATOS EXPERIMENTALES.....	57
	DIAGNÓSTICO	57
2.3.1.	DATOS	58
2.3.1.1.	ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL YESO COMO MATERIA PRIMA.	58
2.3.1.2.	DATOS DE TIEMPOS DE MOLIENDA EN FUNCIÓN DE LA ALIMENTACIÓN EN EL MOLINO PROTOTIPO	60
2.3.2.3.	DATOS EXPERIMENTALES DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE LA MOLIENDA DE YESO.	61

2.4. DATOS ADICIONALES	68
2.4.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MOTOR UTILIZADO PARA EL PROTOTIPO DE MOLINO...	68
2.4.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE PROTOTIPO DE MOLINO.	68
CAPITULO III.....	72
3. DISEÑO.	72
3.1. CALCULOS DE INGENIERÍA.....	72
3.1.1. CALCULO DE LA MOLTURABILIDAD DEL MOLINO	72
3.1.2. CALCULO DE POTENCIA NECESARIA PARA LA MOLIENDA	73
3.1.2.1. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA SEGÚN EL MÉTODO DE BOND.	73
3.1.2.2. CORRECIÓN DE LA POTENCIA DE MOLIENDA	74
3.1.3. CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE ROTACIÓN DEL MOLINO.....	75
3.1.4. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DEL MOLINO	76
3.1.5. ECUACIONES DE SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOLIENDA:.....	78
3.1.5.1. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE S PARA EL PRIMER TAMIZ.	78
3.1.5.2. DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE DE VELOCIDAD DE MOLIENDA DE LOS TAMICES SUBSIGUIENTES.	79
3.1.5.3. DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE ROTURA.....	80
3.1.5.4. DETERMINACIÓN DE LAS FRACCIONES DE MASAS RETENIDAS EN LOS TAMICES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE MOLIENDA (SIMULACIÓN)	81
3.1.6. CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA	85
3.2. DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DEL EQUIPO.	86
3.2.1. DISEÑO DE LA CARCASA DEL MOLINO	86
3.2.1.1. CALCULO DEL VOLUMEN APLICADO POR CARGA DE YESO AL MOLINO.....	86
3.2.1.2. CALCULO DEL VOLUMEN DEL EQUIPO (CARCASA)	87
3.2.1.3. CALCULO DE DIMENSIONES DEL MOLINO (CARCASA).....	88
3.2.2. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE MARTILLOS.....	89
3.2.2.1. Cálculo de la masa de los martillos:.....	89
3.2.2.2. Cálculo de la velocidad tangencial de los martillos:	91
3.2.2.3. Cálculo del facto f:	92
3.2.2.4. Calculo del número de martillos.....	93
3.2.3. DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DEL EJE DEL MOLINO.	94
3.2.3.1. CALCULO DE LA TORSION EJERCIDA POR EL MOTOR DEL MOLINO:.....	94
3.2.3.2. CALCULO DEL DIAMETRO DEL EJE BASADO EN LA RESISTENCIA A LA TORSION DEL EJE	95
3.2.4. TOLVA DE ALIMENTACIÓN.	95
3.3. DETERMINACION DEL TIPO DE MATERIAL PARA LA CONSTRUCCION Y MECANISMOS DE CONTROL.....	98
3.3.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE LOS MARTILLOS PARA ELEGIR MATERIAL DE SEGURIDAD:.....	98
3.3.1.1. DETERMINACION DE AREA DE IMPACTO DEL MARTILLO	98
3.3.1.2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD DEL MARTILLO DEL MOLINO.....	99
3.3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA CONSTRUCCION DEL EQUIPO.	100
3.3.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA ELECTRICO	102

3.4.	REQUERIMIENTO PRESUPUESTARIO	102
3.4.1.	RECURSOS HUMANOS.....	102
3.4.2.	RECURSOS MATERIALES.....	103
3.4.3.	RECURSOS TOTALES	105
3.4.4.	MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	105
3.4.5.	Dimensionamiento del molino de martillos	108
3.5.	RESULTADOS DE MOLIENDA EN EQUIPO DISEÑADO Y CONSTRUIDO	109
3.6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	116
CAPITULO IV		116
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
4.1.	CONCLUSIONES.....	116
4.2.	RECOMENDACIONES.....	118
BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA		121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
<i>Tabla 1.1.3-1 Especies minerales de sulfato de Calcio -----</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 1.3.1-1 Índices de trabajo de Bond Típicos-----</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 1.5-1 Equipos de trituración y molienda. -----</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 1.5-2 Guía para la selección de los equipos de trituración y molienda -----</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.1-1 determinación del agua libre-----</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.2. Preparación de la muestra para determinaciones posteriores. --</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.4. Determinación del anhídrido carbónico -----</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.5. -----</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.6. Determinación del óxido de hierro y aluminio. -----</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.7. Determinación del óxido de calcio -----</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.8. Determinación del óxido de magnesio -----</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.9. Determinación del anhídrido sulfúrico -----</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 2.2.1.2.1.1.10. Determinación del cloruro de sodio-----</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 2.3.2.1 - 1 Ensayos Químicos para el yeso crudo -----</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 2.3.2.1 – 2 Ensayos Químicos para el yeso molido -----</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 2.3.2.1-3 Ensayos Físicos del yeso crudo-----</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 2.3.2.2-1 Datos de tiempos de molienda para diferentes cargas en el molino prototipo.-----</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 2.3.2.3-1 Datos de análisis granulométrico realizados en equipo prototipo -----</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 2.3.2.3-2 Datos acumulativos de molienda de yeso con igual velocidad a diferente diámetro de alimentación-----</i>	<i>64</i>

<i>Tabla 2.3.2.3-3 Datos acumulativos de la molienda de yeso con igual velocidad a diferentes tiempos de molienda-----</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 2.3.2.3-4 Datos acumulativos de la molienda del yeso con igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidad-----</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 2.4.1-1 Características del motor del prototipo de molino. -----</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 2.4.2-1 Material de construcción del prototipo de molino.-----</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 2.4.2-2 Características del prototipo de molino.-----</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 3.1.3. - 1 Velocidades de operación del molino -----</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 3.1.5.2-1 Funciones de velocidad de molienda de los diferentes de tamices-----</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 3.1.5.3-1 Funciones de rotura del proceso de molienda -----</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 3.2.5.2-1 Simulación de molienda para los diferentes tamices en los diferentes tiempos -----</i>	<i>83</i>
<i>Tabla Valores del factor f -----</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 3.3.2-1 Materiales para la construcción del equipo.-----</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 3.3.3 -1 Materiales para el sistema eléctrico del equipo-----</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 3.4.1-1 RECURSOS HUMANOS -----</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 3.5.2-1 RECURSOS MATERIALES PARA DISEÑO DE EQUIPO -----</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 3.5.2-2 RECURSOS MATERIALES CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO-----</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 3.5.2-3 GASTOS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO -----</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 3.5.2-4 TOTAL RECURSOS MATERIALES-----</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 3.4.3.1-1 RECURSOS TOTALES PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO --</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 3.4.4-1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO -----</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 2.4.2-1 Material de construcción del prototipo de molino.-----</i>	<i>107</i>

<i>Tabla 3.4.5-1 Dimensionamiento del molino de martillos. -----</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 3.5-1 Resultados de molienda con igual diámetro de alimentación pero a diferentes velocidades-----</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 3.5-2 Datos acumulativos de resultados de molienda a igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades -----</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 3.5-3 Resultados de molienda con igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades-----</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 3.5-4 Datos acumulativos de resultados de molienda de igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades. -----</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 3.5-5 Resultados de molienda de yeso con igual diámetro de alimentación y diferentes velocidad-----</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 3.5-6 Datos acumulativos de resultados de molienda de igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades -----</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 3.5-3 Comportamiento de la molienda de yeso a igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades-----</i>	<i>115</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.	Pp.
<i>Fig. 1.1-1 Yeso y estructura cristalina.....</i>	<i>1</i>
<i>Fig. 1.1.2-1 Origen del yeso por proceso evaporítico</i>	<i>3</i>
<i>Fig. 1.1.3-1 Frente de explotación de mina de yeso</i>	<i>6</i>
<i>Fig. 1.1.4-1 Esquema del procesamiento del yeso según su destino.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig. 1.1.4-2 diagrama de flujo del procesado de yeso en la industria de construcción.10</i>	
<i>Fig. 1.2-1 El efecto progresivo de la molienda mostrando la distribución de tamaño de partícula.....12</i>	
<i>Fig. 1.2.1.1-1 Esfuerzo versus deformación para el comportamiento elástico-lineal para una esfera de vidrio de 38 μm de diámetro.....14</i>	
<i>Fig. 1.2.1.1-2.a) Esfuerzo vs deformación para la deformación elasto-plástica de una partícula mineral de 4 μm. b) Esfuerzo vs deformación para un material visco – elástico.16</i>	
<i>Fig. 1.2.1.2.1-1 Ilustración de las fuerzas entre moléculas en un sólido (a) fuerza cohesiva, (b) energía potencial17</i>	
<i>Fig. 1.2.1.2.2-1. Desarrollo de un árbol de grietas durante la propagación de la fractura, observado por fotografía de alta velocidad. Las imágenes han sido modificadas aclarando el fondo y mostrando la zona de las grietas en seudorelieve. ..19</i>	
<i>Fig. 1.3.2-1 Relación de energía utilizada según clases de molinos.....23</i>	
<i>Fig. 1.5-1: Mecanismos de aplicación de fuerzas que originan la reducción de tamaño29</i>	

<i>Fig. 1.5-2: Ilustración del estado de esfuerzo en un sólido desde el punto de</i>	
<i>vistamolecular</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 1.5.1-1 Molino de martillos</i>	<i>34</i>
<i>Fig. 1.6.1-1. Ilustración de la fracción de material fracturado desde un monotamaño</i>	
<i>que queda en un intervalo de tamaño determinado.</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 2.3.2.2-1 Datos de tiempos de molienda, y residuos dentro de la cámara de</i>	
<i>molienda para diferentes cargas en el molino prototipo.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 2.3.2.3-1 Análisis granulométrico de la molienda del yeso a igual velocidad (2071</i>	
<i>rpm) pero con diferentes diámetros de alimentación.....</i>	<i>64</i>
<i>Fig. 2.3.2.3-2 Análisis granulométrico de la molienda del yeso con la misma velocidad</i>	
<i>(1253 rpm) pero a diferente tiempo de molienda.....</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 2.3.2.3-3 Análisis granulométrico del yeso con el mismo diámetro de alimentación</i>	
<i>(4,5 cm) pero con velocidades diferentes</i>	<i>66</i>
<i>Fig. 2.3.2.3-4 Análisis granulométrico de la molienda del yeso a diferentes velocidades</i>	
<i>de molienda</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 3.2.5.2-1 Comportamiento de molienda de yeso sobre los tamices en diferentes</i>	
<i>tiempos de proceso</i>	<i>84</i>
<i>Fig. 3.2.2.1-1 Martillo diseñado para molino</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 3.2.4-1 Esquema de la tolva de alimentación.....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 3.2.1.1-1 Área de exposición el impacto en el martillo</i>	<i>98</i>
<i>Fig. 3.5-1 Comportamiento de la molienda con igual diámetro de alimentación pero</i>	
<i>con diferentes velocidades.....</i>	<i>111</i>

<i>Fig. 3.5-2 Comportamiento de la molienda de yeso a igual diámetro de alimentación</i>	
<i>pero con diferentes velocidades.....</i>	<i>113</i>

RESUMEN

El Diseño y Construcción de un Molino de Martillos con Tamiz Intercambiable para Pulverizar Yeso Crudo permitirá el aprendizaje de operaciones unitarias en la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

El dimensionamiento del equipo se realizó mediante pruebas experimentales, cálculos de ingeniería y simulaciones de proceso con modelos matemáticos, considerando tres variables principales: Tiempo de residencia, velocidad de molienda, y tamaño de partícula en la alimentación. El molino está construido de Acero Inoxidable 430 y 304 para la carcasa y la tolva de alimentación, misma que tiene una capacidad de 19,43 L. El molino está conformado de 20 martillos elaborados en Acero DF2, la potencia de molienda es de 3HP, trabaja con velocidades de 1520 - 1774 – 2112 rpm y posee un tamiz intercambiable de 1000 μ m y un área de tamizado de 58000mm².

En el molino construido se obtiene Yeso pulverizado trabajando con una eficiencia de 95,5%. Pulveriza una carga de 2,0 kg de yeso en un tiempo de 0,5 min y el 75,09% del yeso obtenido pasa a través de un tamiz de 212 μ m y cumpliendo así con la Norma Técnica INEN de yeso para construcción. Para una adecuada molienda es necesario que el material a moler no exceda 3cm de diámetro, el volumen de llenado del equipo no supere el 30% del volumen interno del equipo y que la humedad de la alimentación sea menor al 15% condiciones que favorecen la reducción de tamaño.

SUMMARY

The Design and Construction of a Hammer Grinder with exchanging sieve to pulverize raw gypsum will permit the learning of unitary operations at the Science Faculty of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

The equipment dimensions were carried out through experimental tests, engineering calculi and process simulations with mathematical models, considering three principal variables: residence time, grinding velocity and size of the feeding particle. The grinder is constructed of stainless steel 430 and 304 for the case and the feeding hopper which has 19,43 L capacity. The grinder is made up of 20 hammers elaborated with steel DF2; the grinding power is 3HP and works with speeds of 1520-1774 and 2112 rpm and has an exchangeable sieve of 1000 μm and a sieving area of 58000mm^2 .

In the constructed grinder pulverized gypsum is obtained working with 95,5% efficiency: It pulverizes a load of 2,0 Kg gypsum in a time of 0,5 min and the 75,09% gypsum passes through a sieve of 212 μm thus accomplishing with the Technical INEN Norm for construction gypsum. For an adequate grinding it is necessary that the material to be ground do not exceed the 3 cm diameter; the equipment filling volume must not surpass the 30% of the equipment internal volume and that feeding humidity be lower than 15%, conditions which favor the size reduction.

INTRODUCCIÓN

El sulfato de calcio conocido más ampliamente como yeso, es un mineral no metálico ampliamente distribuido y de una gran versatilidad en su uso, aunque el más conocido es en la construcción y en la fabricación de cemento, este también se usa para neutralización de suelos alcalinos y salinos a más de ser una fuente importante de Calcio y Azufre para la agricultura, el yeso también se emplea para trabajos artesanales, como aislante térmico, para fabricar tizas, en medicina, en odontología entre otros.

El uso del yeso al igual que el de otros materiales se encuentra condicionado al tamaño de partícula, por lo que es necesario entonces una reducción de tamaño. El presente trabajo está orientado al diseño y construcción de un sistema mixto de molienda y tamizado que asegure un diámetro de partícula de yeso de acuerdo a las normas técnicas vigentes.

Para este proyecto se utilizó un prototipo de molino de martillos en el cual se realizaron los ensayos experimentales con yeso crudo, de los cuales se obtuvieron datos de fundamental importancia para el diseño del equipo; diseño en el que se incluyen los modelos matemáticos y ecuaciones conocidas para la operación unitaria de molienda y tamizado, así como también se incluyen los análisis de laboratorio correspondientes para el yeso.

Todo este trabajo está orientado a brindar un equipo energéticamente eficiente, ambientalmente amigable, seguro, y fácil de operar. Su disposición final serán los laboratorios de la Facultad de Ciencias donde los estudiantes puedan realizar prácticas de molienda y tamizado. Dado el perfil profesional de los estudiantes de ingeniería en el área minera, el vertiginoso crecimiento de la industria de construcción, del uso de asfalto rígido, y la cercanía a empresas locales de elaboración de cemento resaltan la capital importancia de dotar al laboratorio con un equipo de molienda y tamizado para este material, así se sigue involucrando a la Universidad con la industria y se vincula al estudiante con los procesos industriales en la forma más real posible.

ANTECEDENTES

No existe un acuerdo o certeza total en cuanto al lugar donde aparecieron los primeros molinos o quien fue su inventor, pero el hecho es que la humanidad se ha servido desde tiempos remotos de este instrumento para realizar reducción de tamaño y sacar provecho de ellos de cualquier forma desde fines culinarios hasta fines de construcción, así por ejemplo la harina para elaborar pan y en construcción el yeso, del que dicho sea de paso es uno de los más antiguos materiales empleado en construcción. En el período Neolítico, se lo utilizaba para unir las piezas de mampostería, sellar las juntas de los muros y para revestir los paramentos de las viviendas, sustituyendo al mortero de barro.

Desde que Rittinger, realizó su primer postulado en 1867, y Kick realizara lo mismo en 1885 a nivel mundial se han realizado estudios referentes a la reducción de tamaño y clasificación granulométrica de gran variedad de sólidos, incluyendo entre éstos: materiales mineros como también alimentos, madera, basura, y otros. Muchos de estos estudios serios y responsables han servido a un sinnúmero de empresas grandes inclusive multinacionales a ofertar la venta de equipos para acondicionamiento de tamaño; específicos para cada necesidad de la industria, siendo quienes lideran el mercado compañías europeas, norteamericanas y brasileñas en Sudamérica. Esta realidad ha limitado a los profesionales a realizar únicamente la selección de un equipo, con costos que superan por mucho el diseño y construcción con materiales que se encuentran a disposición en el mercado nacional. Aunque en algunas de las mecánicas industriales existentes se facilita la construcción de estos equipos un tanto empírico, se constituyen en otro proveedor para la industria, tanto a nivel nacional como de la provincia.

En la ESPOCH, también se han hecho estudios sobre el uso de molinos de martillos, especialmente en el área de rediseño y optimización de procesos, como el hecho en la Facultad de Mecánica bajo el título de “Repotenciación, construcción, montaje y pruebas de una planta de balanceado de la comunidad del Valle del Anzú provincia de Pastaza”, donde se hace mención al uso de un molino de martillos de fabricación “artesanal” al cual se lo estudia, mejora y se realizan cambios sobre el equipo fabricado.

Otro estudio es el de procesamiento de papa china, donde se sugiere el uso en la línea de proceso, de un molino de martillos, y que hasta ese entonces no se contaba, ni se cuenta al momento con un molino de esas características. La Facultad de Ciencias de la ESPOCH, al momento no cuenta con un molino de martillos, y para realizar el trabajo de éste, los estudiantes tienen que realizar sus prácticas en otros equipos entre los que figuran un molino de cuchillas y un molino a escala de bolas.

El material que se seleccionó para la molienda, el yeso, se constituye en uno de los más antiguos materiales originados por la minería, los depósitos de yeso en el ámbito mundial se extienden por casi todas las eras geológicas, presentándose tanto en grandes superficies como en cuerpos estratificados y lenticulares a partir de procesos evaporíticos. En el ámbito de América Latina desde México hasta el sur (Argentina), los depósitos yesíferos se encuentran como depósitos sedimentarios evaporíticos, entre los países latinoamericanos donde la producción de yeso es importante, se concentra en Brasil, México y Uruguay y según la información producida por el Servicio Geológico Americano la producción mundial de yeso alcanzó en el año 2004 los 106 Mt.. Aunque en Ecuador se admite la existencia de grandes reservas de yeso de excelente calidad, no existen estudios referentes a la localización de estas áreas por tratarse de un mineral no metálico. El Ministerio de Recursos Naturales no Renovables a través del SIGMA, realizó un estudio referente a yesos y fosfatos en el Ecuador, del cual no se exponen aún los resultados. En Ecuador la explotación de yeso está concentrada en la zona sur del país en la Provincia de Loja (Malacatos y Bramaderos) y satisface parcialmente, los requerimientos de la industria del cemento y parte de la construcción (Proaño y Jarrín 2000), la demanda restante se satisface con la importación de yeso molido de países vecinos. Esperamos que con proyectos como éste se ponga énfasis en los minerales no metálicos que son de gran interés para el país.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la Industria demanda profesionales que estén íntimamente relacionados con los procesos, que manejen y dominen las Operaciones Unitarias presentes en las diferentes líneas de producción, es en este punto que toman capital importancia los laboratorios especializados en procesos y operaciones.

Las Operaciones Unitarias pilar fundamental en la formación académica de los estudiantes de Ing. Química, se deben distinguir como el complemento perfecto entre teoría y práctica, siendo esta última de vital importancia en el estudiante para la comprensión de las mismas, en este contexto, hemos visto la necesidad que presenta nuestro laboratorio de química industrial, en cuanto al estudio de los procesos de molienda y clasificación granulométrica de partícula, dos de la muchas operaciones unitarias que se encuentran a diario en los diferentes procesos industriales, ya sea en el acondicionamiento de tamaño de materias primas, en el producto terminado o inclusive en los desechos resultantes de dicho proceso, lugares en los cuales es indispensable la presencia de un Ing. Químico. Al momento, el laboratorio de Química Industrial de la Facultad de Ciencias – ESPOCH, no cuenta con un molino de martillos con sistema de tamizado incorporado, motivo por el cual se ha seleccionado realizar el diseño y construcción del mismo, ya que, además este molino brinda una versatilidad única en los procesos de molienda, impide la contaminación cruzada, y gracias a la incorporación de tamices intercambiables se garantiza la granulometría deseada luego de su uso, por enumerar unas pocas ventajas del molino. Estimamos además que el aporte a la didáctica educativa de operaciones unitarias, al contar con un molino versátil, y donde se puedan realizar variedad de estudios, o inclusive investigación científica de trascendental importancia.

Pero este trabajo es importante además ya que el minucioso diseño del molino proporciona un equipo altamente eficiente no solo en la disminución de tamaño y posterior clasificación granulométrica sino que también eficiente en consumo de energía, seguro para el operario y también para el medio ambiente ya que no elimina polvos ni contaminantes no deseados al ambiente, es decir son aspectos que la industria y la comunidad científica consideran importantes. Todo esto se complementa con el uso de yeso como material de molienda un mineral no – metálico de fácil acceso, y de

amplia distribución, además de ser un material barato, es un material seguro y de fácil manipulación cuyo producto molido se puede guardar por períodos prolongados de tiempo bajo condiciones normales y se le puede dar diversos usos: en construcción, cementos, medicina, odontológicos, artesanales, arquitectónicos, etc.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un molino de martillos con sistema de cribado incorporado para pulverizar yeso crudo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Realizar las pruebas de simulación que definen las variables de proceso del sistema mixto de molienda y tamizado.
- ❖ Realizar el diseño de Ingeniería del sistema mixto que incluye cálculos, dimensionamiento del equipo, control y presupuesto.
- ❖ Construir el equipo mixto de molienda y tamizado en base al diseño de Ingeniería.
- ❖ Realizar pruebas de arranque y validación del equipo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1.YESO

El yeso es un mineral – no metálico de fórmula: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, abundante en regiones sedimentarias denominadas geológicamente Kársticas por meteorización química de determinadas rocas: calcáreas, calizas, dolomías, aljez, etc. compuestas por minerales solubles en agua. El yeso tiene una estructura monoclinica, esto significa que tiene tres ejes desiguales, dos de los cuales son perpendiculares al tercero, pero no entre sí.

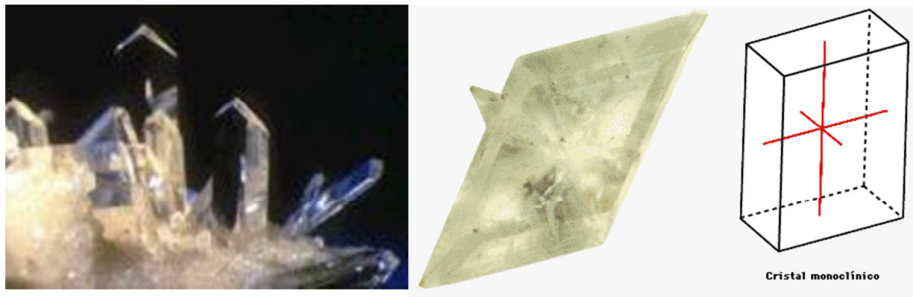


Fig. 1.1-1 Yeso y estructura cristalina

1.1.1. GENERALIDADES

Es más conocido por un producto preparado a partir de piedras naturales como el aljez u otras, (sulfato de calcio di-hidratado: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mediante deshidratación, al que puede añadirse en fábrica determinadas adiciones de otras sustancias químicas para modificar sus características de fraguado, resistencia, adherencia, retención de agua y densidad, que una vez amasado con agua, puede ser utilizado directamente. También, se emplea para la elaboración de materiales prefabricados. El yeso, como producto

industrial, es sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Se comercializa molido, en forma de polvo. Una variedad de yeso natural, denominada alabastro, se utiliza profusamente, por su facilidad de tallado, para elaborar pequeñas vasijas, estatuillas y otros utensilios.

1.1.2. ORIGEN

El yeso natural y la anhidrita natural proceden de depósitos formados por la evaporación y posterior cristalización de lagunas saladas, de aquí la denominación de **Evaporitas**.

Los mares contienen una gran proporción de sales, el contenido medio en sales de los mares y océanos permite establecer la naturaleza de las sales que precipitan a partir del agua de mar, gracias a la evaporación: en primer lugar se alcanza la saturación en sulfato cálcico, que es el menos soluble, así que serán yeso o anhidrita los primeros minerales que precipiten. A continuación se produce la saturación en cloruro sódico, produciéndose la precipitación de halita (cloruro sódico). Por último precipitan los cloruros de potasio y magnesio (silvina, carnalita...), que son los más solubles.

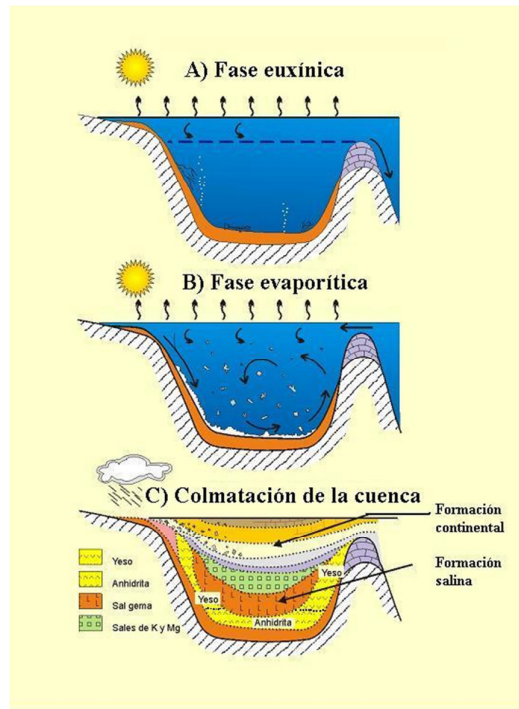


Fig. 1.1.2-1 Origen del yeso por proceso evaporítico

Sobre este modelo general, en cada cuenca concreta suele darse un predominio de unos u otros minerales: en algunos casos será el yeso (a menudo acompañado de anhidrita) el mineral mayoritario, lo que permite su explotación, en otros, el cloruro sódico (halita), y en otros, los cloruros de potasio y magnesio

1.1.3. ESTADO NATURAL

En estado natural el aljez, *piedra de yeso*, contiene 79,07% de sulfato de calcio anhidro y 20,93% de agua y es considerado una roca sedimentaria, incolora o blanca en estado puro, sin embargo, generalmente presenta impurezas que le confieren variadas coloraciones, entre las que encontramos la arcilla, óxido de hierro, sílice, caliza, etc.

Con relación a las especies minerales formadas a partir del sulfato de calcio, se mencionan:

Tabla 1.1.3-1 Especies minerales de sulfato de Calcio

COMPUESTO	FORMULA	CARACTERISTICAS PRINCIPALES
Anhidrita	CaSO_4	<ul style="list-style-type: none"> • Color gris azulado • Alta solubilidad: 0.2 g /100 g de H_2O
Basanita	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Fase intermedia entre anhidrita y yeso. • Variedad escasa en la naturaleza. • Es producido por calentamiento de yeso • Se destina a la fabricación de revoque
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Alta variedad de los cristales y texturas. • Mineral principal de las minas. • Texturas organizadas en unidades estratigráficas.
Alabastro	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Es sulfato de calcio formado por finos cristales. • Permite realizar trabajos uniformes fácilmente para esculturas.
Espato satinado	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Aparece rellenando fracturas en formas de agujas alargadas que se disponen perpendicularmente a las paredes de las fallas. • Fibroso con brillo satinado • No son componente principal de las

		minas de yeso.
Selenita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Formado por grandes cristales con clivaje desarrollado. • Variedad transparente e incolora.
Yeso sacaroide	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Es una acumulación desordenada de pequeños cristales (grano fino - medio) • Es similar a granos de azúcar.
Gypsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> • Se origina por proceso evaporítico de aguas subterráneas. • Se desarrolla en depósitos arcillo limoso formando aglomeraciones con textura radiadas o capas estratiformes.

Fuente: Minerales para la agricultura en América Latina. PONCE, M./ DUGGAN, M.

Generalmente los depósitos de yeso contienen entre un 10 a 15% de impureza, aún cuando se hallan yacimientos con un contenido superior al 95 % de sulfato de calcio.

Si se toma en cuenta la presencia de impurezas con su consecuente efecto en los procesos de elaboración y productos finales de yeso, las mismas son agrupadas en tres categorías:

- a) Insolubles o relativamente solubles. Representadas por calizas, dolomita, anhidrita, arcillas anhidras, minerales silíceos, etc.
- b) Minerales evaporíticos solubles incluyendo cloruros, tales como halita, silvita, etc. y sulfatos como mirabilita, epsomita, etc.

- c) Hidratados aunque insolubles, como el grupo de arcillas montmorilloníticas.



Fig. 1.1.3-1 Frente de explotación de mina de yeso

En Ecuador existen minas de yeso localizadas en:

Provincia de Santa Elena, en la Parroquia de Colonche en la Comuna de San Marcos ubicada en la partes baja del Río Javita, a 4 Km. de la cabecera parroquial de Colonche, En la provincia de Loja en Bramaderos y Malacatos. Se han registrado minas también en la provincia del Azuay y de Chimborazo.

1.1.4. Proceso

El procesamiento del yeso crudo depende del uso final. Si se aumenta la temperatura hasta lograr el desprendimiento total de agua, fuertemente combinada, se obtienen durante el proceso diferentes yesos empleados en construcción, los que de acuerdo con las temperaturas crecientes de deshidratación pueden ser:

1. Temperatura ordinaria: piedra de yeso, o sulfato de calcio bihidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
2. 107 °C: formación de sulfato de calcio hemihidrato: $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$.

3. 107 - 200 °C: desecación del hemihidrato, con fraguado más rápido que el anterior: yeso comercial para estuco.
4. 200 - 300 °C: yeso con ligero residuo de agua, de fraguado lentísimo y de gran resistencia.
5. 300 - 400 °C: yeso de fraguado aparentemente rápido, pero de muy baja resistencia
6. 500 - 700 °C: yeso Anhidro o extra cocido, de fraguado lentísimo o nulo: yeso muerto.
7. 750 - 800 °C: empieza a formarse el yeso hidráulico.
8. 800 - 1000 °C: yeso hidráulico normal, o de pavimento.
9. 1000-1400 °C: yeso hidráulico con mayor proporción de cal libre y fraguado más rápido.

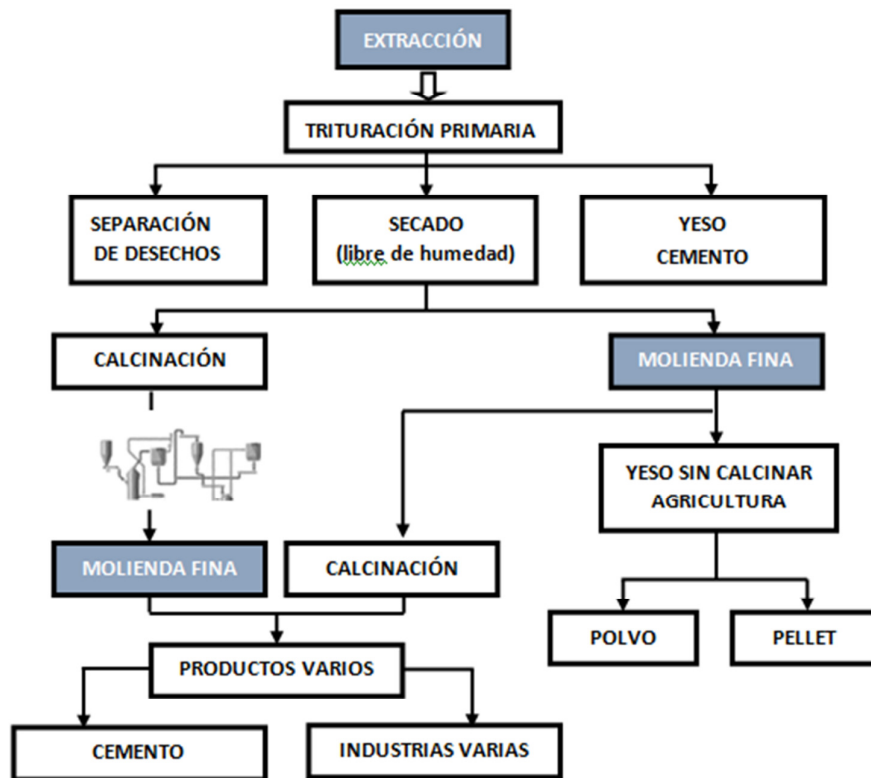


Fig. 1.1.4-1 Esquema del procesamiento del yeso según su destino

Dado que el principal uso del yeso es en la industria de construcción, a continuación se realiza una descripción del proceso que sigue el yeso en esta industria. La trituración de la materia prima consiste en reducir el tamaño del mineral conforme viene de la cantera, de 1 m³, hasta un tamaño comprendido entre 0-40 mm. Para conseguir realizar esta reducción se utilizan machacadoras de mandíbulas donde se disminuye el tamaño por compresión.

Luego el material es conducido a silos donde se homogeniza la materia prima que será conducida ya sea para fabricación de cemento o para el proceso de calcinación para lo cual pasa a una trituración secundaria que se realiza en molinos de rodillos lugar en el cual el material es forzado a pasar entre una placa y un rodillo o entre dos rodillos

(rugosos o lisos) que giran reduciendo el tamaño de partícula, como también se pueden usar molinos de martillos para obtener los tamaños de partículas más pequeños se emplean molinos de martillos. Un molino de martillos, machaca un material que no es muy duro, por medio de martillos que giran a gran velocidad (entre 2000 rpm y 4000 rpm). El material es forzado contra una placa sólida rugosa que disminuye el tamaño de las partículas. Finalmente, el material es forzado contra una rejilla de descarga en donde las partículas más finas caen a través de la rejilla mientras que las partículas más grandes viajan alrededor para otro ciclo machacante. El yeso que sale de la trituración secundaria se encuentra listo para el siguiente proceso de calcinación, a través del cual se realizan las reacciones de deshidratación y cambio de fase para conseguir semihidrato, anhidrita, etc. según el tipo de fases que se quiera obtener se utilizarán diferentes tipos de hornos: rotatorio, marmita y otros hornos de fuego indirecto, u hornos flash, ya casi al final del proceso se tiene la etapa de afino los productos obtenidos en la etapa anterior son sometidos a un afinado ó molienda para conseguir tamaños de partículas adecuados según el producto final a conseguir, así por ejemplo, para yesos de construcción: necesitan tener un tamaño granulométrico comprendido entre 0 y 1,5 mm. Para ello es suficiente utilizar molinos de martillos, a velocidad media de 900-1200 rpm, en circuito cerrado con el cribado para garantizar su granulometría final.

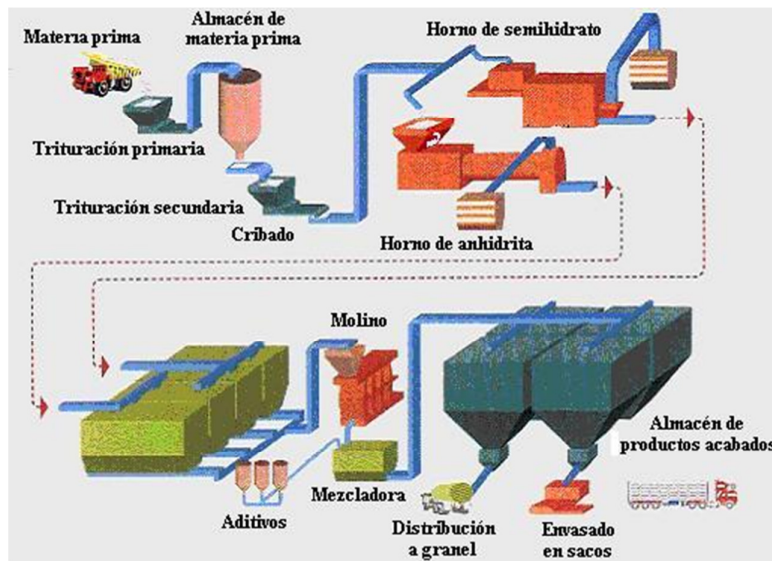


Fig. 1.1.4-2 diagrama de flujo del procesamiento de yeso en la industria de construcción

1.1.5. USOS

Es utilizado profusamente en construcción como pasta para guarnecidos, enlucidos y revoques; como pasta de agarre y de juntas. También es utilizado para obtener estucados y en la preparación de superficies de soporte para la pintura artística al fresco.

Prefabricado, como paneles y bases de yeso (Dry Wall o Sheet rock) para tabiques, y escayolados para techos, se pueden realizar paneles pre-decorados, capa base para pisos, cielos rasos, productos de aislamiento térmico y control acústico, acabados texturizados, baldosines.

Se usa como aislante térmico, pues el yeso es mal conductor del calor y la electricidad.

Industrialmente se lo usa como carga en la fabricación de papel, como mastico adhesivo en la fabricación de bombillas, como pigmento y relleno inerte de pinturas y tintas,

como vehículo de sustancias químicas, también como floculante de la industria cervecera, como fijador de sustancias volátiles, cómo retardador en la fabricación de cemento

Para confeccionar moldes de dentaduras, en Odontología. Para usos quirúrgicos en forma de férula para inmovilizar un hueso, también en los moldes ortopédicos.

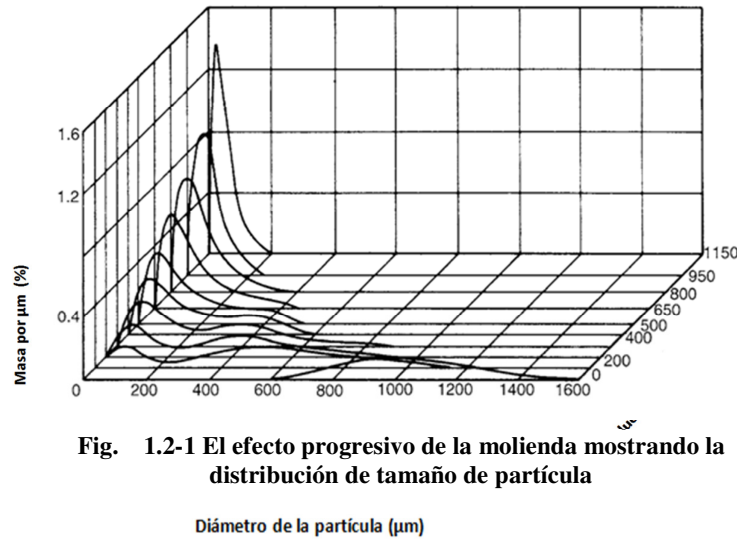
Para esculturas, en la elaboración de tizas para escritura, en la fabricación de cemento. Este también se usa para neutralización de suelos alcalinos y salinos a más de ser una fuente importante de Calcio y Azufre para la agricultura se lo utiliza en el tratamiento de aguas.

1.2.REDUCCIÓN DE TAMAÑO:

La reducción de tamaño se aplica a todas las formas en las que las partículas de sólidos se pueden romper en piezas más pequeñas. En los procesos industriales la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por distintos métodos y con fines diferentes. Las grandes piedras de un mineral **crudo** se desintegran hasta un tamaño manejable. Los productos comerciales han de cumplir rigurosas especificaciones con respecto al tamaño y, a veces, con respecto a la forma de las partículas. La reducción de partículas aumenta la reactividad de los sólidos, permite la separación por métodos mecánicos de ingredientes no deseados y reduce el tamaño de un material fibroso para su fácil tratamiento.

El tamaño de las partículas guarda relación tanto con la estructura interna del material, como también con el proceso por el cual la reducción de tamaño se efectúa. Este proceso es ilustrado por experimentos de molienda de carbón en un molino pequeño, desarrollado por HEYWOOD mostrados en la figura 1.2-1 donde la distribución del

tamaño de partículas en el producto es mostrado como una función del número de revoluciones del molino.



La distribución inicial del tamaño muestra un solo comportamiento correspondiente a un tamaño relativamente grande lleno de fisuras (comportamiento transitorio), pero en el grado en que la rotura incrementa gradualmente por las fisuras o grietas el material decrece en magnitud y un segundo comportamiento desarrolla un particular tamaño (comportamiento persistente), aquí aparece un límite de molienda limitada por el material en particular y el equipo utilizado. Después de algún tiempo parecerá haber pequeños cambios en el tamaño de la partícula, si la molienda continúa, aunque las partículas pueden presentar algunas deformaciones plásticas irreversibles, de las cuales resultan en un cambio de la forma sin intervenir en el tamaño.

1.2.1. MECÁNICA DE FRACTURA DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO

La ciencia básica involucrada en la conminución (Operación que incluye todos los procesos de reducción de tamaño, esto es: la trituración y molienda) es la Mecánica de

Fractura, sin embargo, existen pocos aspectos del diseño de procesos de molienda que utilicen conceptos de mecánica de fractura. Es más, cuando las leyes de la mecánica de fractura han sido invocadas para explicar los datos de molienda o desarrollar leyes de diseño, la mayor parte de las veces han sido aplicadas en forma errada y de esta manera han creado una gran confusión. En esta sección se reseñan los conceptos básicos de fractura desde el punto de vista de la reducción de tamaño por molienda y se muestra el por qué es tan difícil efectuar cálculos de diseño desde un razonamiento teórico.

1.2.1.1.ESFUERZOS, DEFORMACIONES UNITARIAS Y ENERGÍA.

Para producir reducción de tamaño se debe aplicar esfuerzos y producir fractura. Un análisis teórico cuantitativo es solamente posible para estados de esfuerzos relativamente simples, pero los conceptos que surgen de estos resultados son beneficiosos para entender en forma cualitativa las complejas condiciones de esfuerzo en trituradoras y molinos industriales.

Cuando un material sólido es sometido a un esfuerzo sufre una deformación. El estudio de este fenómeno corresponde a la mecánica del medio continuo. La descripción del comportamiento del sólido requiere la postulación de una ecuación constitutiva que relacione esfuerzos y deformaciones y que debe obtenerse de la experimentación con el material. Sometiendo diversos materiales a esfuerzos de tensión conocidos, es posible medir cada deformación producida y clasificar su comportamiento como *elástico* o *inelástico*.

El comportamiento *elástico* de un material se caracteriza porque la respuesta a los esfuerzos es afectada sólo por el esfuerzo presente. No existen efectos de memoria que

comprometan la respuesta posterior del material. La energía acumulada durante la carga del sólido es recuperada íntegra e instantáneamente durante la descarga. Si la ecuación constitutiva de un material sólido elástico es lineal, se dice que su comportamiento es elástico-lineal. La Figura 1.2.1.1-1 esquematiza la ecuación constitutiva de un material elástico lineal en una dimensión. Esta ecuación constitutiva se denomina ley de Hooke y es:

$$\sigma = Y * \varepsilon \quad \text{Ec.: 1.2.1.1 - 1}$$

$$\varepsilon = \frac{(d-d_0)}{d_0}$$

$$\text{Ec.: 1.2.1.1 - 2}$$

Donde ε es igual a la deformación unitaria; d y d_0 son el tamaño actual y tamaño inicial de la muestra. El parámetro Y (módulo de Young), representa la pendiente de la recta de la Figura 1.2.1.1-1. El material se comporta elásticamente hasta el punto C. El valor del esfuerzo y de la deformación unitaria en este punto se denota por σ_c y ε_c , siendo σ el esfuerzo de tensión. El módulo de Young queda expresado por:

$$Y = \sigma / \varepsilon , \quad \sigma < \sigma_c , \quad \varepsilon < \varepsilon_c \quad \text{Ec.: 1.2.1.1 - 3}$$

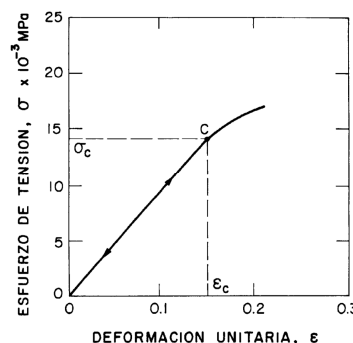


Fig. 1.2.1.1-1 Esfuerzo versus deformación para el comportamiento elástico-lineal para una esfera de vidrio de 38 um de diámetro

Para un cristal perfecto, Y depende de las orientaciones de los esfuerzos, pero los materiales de mayor interés para nosotros son sólidos frágiles policristalinos con una distribución de cristales al azar, de manera tal que Y resulta ser una constante isotrópica elástica efectiva.

Existen materiales cuya respuesta a una sollicitación no es elástica. La razón puede ser que el material se deforma permanentemente o que su comportamiento depende del tiempo. Ambos disipan energía durante la deformación. Se puede distinguir dos tipos de inelasticidad, el comportamiento plástico y el comportamiento viscoso. Estos tipos de inelasticidad se superponen al comportamiento elástico y constituyen lo que se denomina comportamiento *elasto-plástico* y comportamiento *visco-elástico*. El comportamiento elasto-plástico Fig.(Fig. 1.2.1.1-2 a) lleva a una deformación permanente del material, que no desaparece con el tiempo, por lo que se la trata como independiente de éste. La descripción se basa en el límite de fluencia como constante del material, además del módulo de Young. La energía disipada corresponde al área bajo la curva σ versus deformación. El comportamiento visco-elástico se caracteriza por su gran dependencia de la velocidad con que se lleva a efecto. Mientras más lenta la carga, más inelásticamente se comporta el material (Fig. 1.2.1.1-2 b). Un material se puede comportar elásticamente en tiempos cortos, y visco-elásticamente en tiempos mayores, dependiendo el rango de comportamiento elástico de la temperatura. Por esta razón cuando se desea romper materiales visco-elásticos, tales como el cloruro de polivinilo, se debe controlar la temperatura y la velocidad de aplicación de los esfuerzos para que el material se comporte elásticamente.

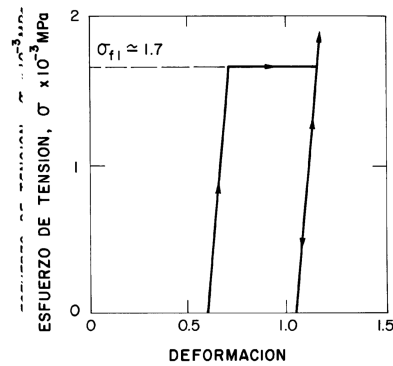


Fig. 1.2.1.1-2.a) Esfuerzo vs deformación para la deformación elasto-plástica de una partícula mineral de 4 μm . b) Esfuerzo vs deformación para un material visco-elástico
Fig 1.2.1-1

1.2.1.2. Resistencia cohesiva ideal, concentración de esfuerzos y la Teoría de Grietas de Griffith

1.2.1.2.1. Resistencia Cohesiva Ideal.

El concepto de *resistencia cohesiva ideal* puede ser ilustrado mediante un sólido constituido por planos de moléculas sujetos a una tensión unidimensional simple. La tensión estira los enlaces entre las moléculas, como se ilustra en la Figura 1.2.1.2.1-1a, donde las flechas indican las fuerzas intermoleculares de atracción y repulsión. En el estado deformado (estirado) cualquier molécula cumple todavía un balance de fuerzas pero, como se muestra en la Figura 1.2.1.2.1-1b, el alejamiento del equilibrio venciendo las fuerzas de atracción requiere una adición de energía (integral de la fuerza por la distancia), alcanzando el sólido un nuevo equilibrio en un estado de energía más alto (energía de deformación almacenada). La máxima fuerza de atracción que el sólido puede ejercer sobre la capa de la superficie corresponde al punto de inflexión de la curva de energía potencial, y una tensión externa que exceda este máximo, causa un

desequilibrio de fuerzas y la aceleración de un plano de moléculas respecto a otro. El sólido se desintegraría en cada uno de sus planos interiores.

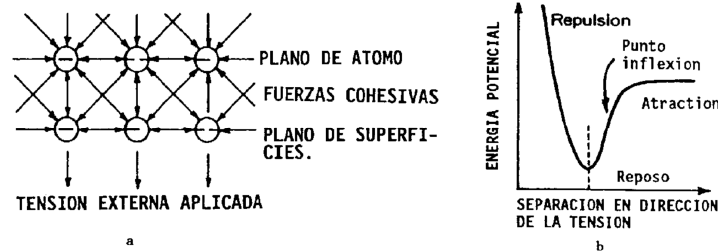


Fig. 1.2.1.2.1-1 Ilustración de las fuerzas entre moléculas en un sólido (a) fuerza cohesiva, (b) energía potencial

1.2.1.2.2. Concentración de Esfuerzo: Teoría de Grietas de Griffith.

La teoría de la fractura estudia la iniciación de grietas a partir de fallas (grietas microscópicas) y su propagación en el material. De acuerdo al comportamiento en este sentido, la fractura puede ser *frágil* o *dúctil*. La *fractura frágil* se caracteriza por una deformación elástica antes de la ruptura y por una rápida velocidad de propagación de la grieta. La *fractura dúctil* va acompañada de una gran deformación plástica alrededor de las grietas antes y durante su propagación.

La suposición fundamental fue que el material es un sólido elástico y frágil conteniendo un gran número de grietas microscópicas, que posteriormente tomaron el nombre de *fallas de Griffith*. **Al someter tal material a una tensión, los esfuerzos se concentran en las puntas de las fallas estableciéndose un frente de ruptura por donde se propaga la grieta.**

La densidad por unidad de volumen, es:

$$E_v = 1,06 * \left(\frac{1 - \nu^2}{Y} \right)^{2/3} * \sigma_c^{5/3} \quad \text{Ec. : 1.2.1.2.2 - 1}$$

Usando el módulo de Young para el cuarzo: $Y = 8.71 \times 10^4 \text{ MPa}$, la energía crítica para la ruptura de la partícula del cuarzo, con $\sigma_c = 88.5 \text{ MPa}$ es de $E_v = 0.9 \times 10^6 \text{ J/m}^3$. Como la densidad del cuarzo es de 2.62 ton/m^3 y $1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$, la densidad de energía para la fractura resulta ser 0.1 kWh/ton .

Los experimentos para determinar la resistencia a la fractura de esferas como función del tamaño demuestran que generalmente la resistencia a la tensión aumenta al disminuir el tamaño. Esto se explica suponiendo que en las esferas más pequeñas hay menor probabilidad que existan fallas largas de Griffith en la región de máximo esfuerzo de tensión. Este efecto se expresa mediante la relación:

$$\sigma_c = \sigma_o * (V_o/V)^{1/m} \quad \text{Ec. : 1.2.1.2.2 - 2}$$

Donde V es el volumen de la esfera, σ_o es la resistencia a la tensión que corresponde a un volumen normal V_o y m es el coeficiente de uniformidad de Weibull. Un valor grande de m significa que las fallas son pequeñas comparadas con el tamaño de la muestra, de manera que la probabilidad que exista una falla grande en una región particular del sólido no varía mucho con el tamaño.

Las rocas, minerales y carbones al ser fracturados en máquinas de reducción de tamaño sufrirán generalmente una fractura frágil a partir de las fallas de Griffith preexistentes.

La distribución granulométrica de la serie de fragmentos producidos por la fractura es tan importante como la fractura misma y no existe una teoría conocida para su predicción. Una grieta puede propagarse lentamente si ella se encuentra con una región de esfuerzos de compresión los que cierran el extremo, especialmente en el caso de materiales dúctiles. Sin embargo la teoría predice, y los experimentos confirman, que una fractura que se propaga bajo esfuerzos de tensión local adquiere rápidamente alta

velocidad, del orden de la magnitud de la velocidad del sonido en el sólido. Esto conduce a una onda de esfuerzo que se propaga desde la punta de la grieta y que, por su parte, inicia más fracturas en los defectos que encuentra en su trayectoria. El resultado es una bifurcación de la grieta con bifurcaciones de cada uno de los nuevos brazos, en forma sucesiva para dar un “árbol” de grietas a través del sólido, ver Fig. 1.2.1.2.2-1. La energía asociada al movimiento de la onda pasa la grieta a través de los límites de granos y a través de regiones de esfuerzos compresivos masivos.



Fig. 1 1.2.1.2.2-1. Desarrollo de un árbol de grietas durante la propagación de la fractura, observado por fotografía de alta velocidad. Las imágenes han sido modificadas aclarando el fondo y mostrando la zona de las grietas en seudorelieve.

1.3.Ecuaciones referentes al diseño de equipos de molienda.

En principio es posible predecir el tamaño que debería tener un molino industrial para lograr una determinada capacidad a partir de datos obtenidos en ensayos continuos en escala de laboratorio, siempre que se conozcan las correspondientes leyes de escalamiento. En la práctica es difícil obtener una *similitud* exacta entre el molino industrial y el molino de laboratorio, y los ensayos son difíciles de realizar. Por otra parte, cuando el molino de laboratorio se elige suficientemente grande para obtener una buena similitud, el ensayo se convierte en escala piloto.

1.3.1. MÉTODO DE BOND PARA EL DISEÑO DE MOLINOS

El objetivo del método es seleccionar el diámetro y largo de un molino para producir Q toneladas por hora de un material con un porcentaje Ψ menor que el tamaño P_i . Se debe especificar además las condiciones de los martillos y la potencia del molino.

El método consta de seis etapas importantes:

- (1) Un ensayo de “moliendabilidad” normalizado para el material, o datos tabulados recogidos en un molino prototipo.
- (2) Una ecuación empírica que convierte los resultados de los ensayos de moliendabilidad a los que se obtendrían en un molino continuo, con descarga.
- (3) Relaciones de escalamiento que permiten predecir el resultado en molinos mayores.
- (4) Una serie de factores de corrección, basados en la experiencia, que permiten describir otras condiciones de operación.
- (5) Una ecuación empírica que permite calcular la energía específica consumida para una determinada razón de reducción.
- (6) Una ecuación empírica que permite calcular la potencia necesaria para mover un molino en función de la masa de medios de molienda.

Por comparación de ensayos realizados en la etapa 1 con resultados experimentales de molienda a escala piloto, Bond concluyó que el material se podía caracterizar mediante un parámetro que denominó Índice de Trabajo W_{IT} y que relacionó con la moliendabilidad del ensayo normado según la ecuación empírica:

$$W_{IT} = \frac{(1.1)(44.5)}{p_i^{0.23} Gbp^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{QT}}} - \frac{10}{\sqrt{x_{GT}}} \right)} \quad \text{Ec.: 1.3.1 – 1}$$

Donde W_{IT} viene expresado en kWh/ton métricas, p_i es el tamaño en micrómetros de la malla de separación, Gbp es la moliendabilidad, x_{QT} es el tamaño del 80% en el producto y x_{GT} es el tamaño del 80% en la alimentación fresca (cercana a 2000 μm), todos determinados en el ensayo de Bond. Se debe destacar que el número 10 en la Ec.: 1.3.1-1 corresponde a $\sqrt{100}$ μm , por lo que $10\sqrt{x}$ es adimensional. El factor 1.1 convierte el Índice de Trabajo de Bond de kWh/tonelada corta a kWh/tonelada métrica.

Tabla 1.3.1-1 Índices de trabajo de Bond Típicos

Material	Índice de trabajo W_{IT} kWh/ton métricas(*)	Material	Índice de trabajo W_{IT} kWh/ton métricas(*)
Arena de Zirconio	28	Pedernal	32
Bauxita	11	Fluorespato	11
Carburo de silicio	32	Granito	12
Clinker de cemento	16	Roca de yeso	8
Cuarzo	16	Hematita	15
Corundo	33	Caliza	15
Dolomita	14	Magnetita	12
Feldespatos	13	Mineral de cobre	13
Ferrosilicio	12	Roca de fosfato	12

Fuente: Diseño y simulación de sistemas de molienda y clasificación AUSTIN L. /CONCHA F.

(*) Estos valores se dan solamente como una guía de la magnitud de W_{IT} . El índice de Trabajo de Bond para un determinado material tiene un rango de valores. Por ejemplo, la caliza tiene propiedades de molienda que va de blanda a muy dura

1.3.2. ENERGÍA PARA LA REDUCCIÓN DEL TAMAÑO:

Uno de las primeras investigaciones acerca de la distribución de la energía alimentada en un molino fue llevado a cabo por Owen quien concluyó que la energía es utilizada como sigue:

- (a) Produciendo deformación elástica de las partículas antes de que la fractura ocurra.
- (b) Produciendo una deformación inelástica el cual resulta con una reducción de tamaño.
- (c) Causar deformación elástica del equipo.
- (d) Fricción entre las partículas, y entre las partículas y las máquinas.
- (e) En el ruido, calor y vibraciones en el equipo, y
- (f) En la fricción perdida del equipo.

Owen estimó que solo el 10% de la potencia total es empleada útilmente. En otras palabras, la cantidad de energía consumida para desmenuzar una cierta cantidad de material depende todavía de las dimensiones iniciales y finales del producto molturado.

Sin embargo, debemos observar que en la práctica la energía que se debe transmitir a la máquina para obtener las dimensiones adecuadas es siempre superior al valor calculado con las reglas anteriores y esto es por el hecho de que el trabajo total exigido comprende:

- Trabajo para vencer la cohesión entre las partículas componentes de las partes a fracturar.
- El trabajo de deformación (deformación plástica y elástica).
- El trabajo absorbido por fricción entre los cuerpos molturantes.
- El trabajo absorbido por las vibraciones.
- El trabajo dispersado en calor.

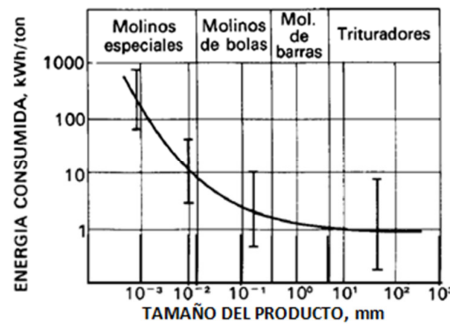


Fig. 1.3.2-1 Relación de energía utilizada según clases de molinos

El coste energético es el de mayor importancia en trituración y molienda, de forma que los factores que controlan este coste son de gran interés. El trabajo necesario para forzarlas se almacena temporalmente en el sólido como energía mecánica de tensión, de la misma forma que la energía mecánica se puede almacenar en el sólido. Al aplicar una fuerza adicional a las partículas tensionadas, éstas se distorsionan más allá de su resistencia final y bruscamente se rompen en fragmentos, generándose nuevas superficies. Puesto que una unidad de área de sólido posee una cantidad definida de energía superficial, la creación de nuevas superficies requiere un trabajo, que es suministrado por la liberación de energía de tensión cuando la partícula se rompe. De acuerdo con el principio de conservación de la energía, toda la energía en exceso sobre la energía de la nueva superficie creada ha de aparecer en forma de calor.

1.3.2.1.LEY DE RITTINGER

Aunque es imposible estimar la cantidad de energía requerida para efectuar una reducción de tamaño para un material dado, un número de leyes empíricas han sido propuestas. Las dos primeras leyes son el resultado de Kick y Von Rittinger, y una tercera ley que resulta la de Bond ha sido propuesta también. Estas tres leyes pueden ser derivadas de la ecuación diferencial básica:

$$\frac{dE}{dL} = -CL^p \quad \text{Ec.: 1.3.2.1 - 1}$$

En el cual los estados de la energía dE requerida para efectuar un pequeño cambio dL en el tamaño de la unidad de masa del material es una función simple de energía para el tamaño. Si $p=-2$, entonces integrando tenemos:

$$E = C \left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right) \quad \text{Ec.: 1.3.2.1 - 2}$$

Escribiendo $C = k_R f_c$, donde f_c es la fuerza cortante del material, y k_R es la constante del molino, luego la ley de Rittinger, primer postulado en 1867, es obtenida por:

$$E = k_R f_c \left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right) \quad \text{Ec.: 1.3.2.1 - 3}$$

Porque la superficie de la unidad de masa del material es proporcional a $1/L$, la interpretación de esta ley es que la energía requerida por reducción de tamaño es directamente proporcional al incremento en superficie.

1.3.2.2.LEY DE KICK

Si en la Ec.: 1.3.2.1-1 $p=-1$, entonces:

$$E = C \ln \frac{L_1}{L_2} \quad \text{Ec.: 1.3.2.2 - 1}$$

Y, escribiendo $C = k_K f_c$:

$$E = k_K f_c \ln \frac{L_1}{L_2} \quad \text{Ec. : 1.3.2.2 - 2}$$

Relacionando la ecuación en término de potencia, tenemos:

$$\frac{P}{m} = k_K f_c \ln \frac{L_1}{L_2} \quad \text{Ec. : 1.3.2.2 - 3}$$

Ecuación propuesta por Kick en el año de 1885, basada en el análisis de esfuerzos de la deformación plástica dentro del límite de elasticidad, y establece que el trabajo que se requiere para triturar una masa dada de material es constante para la misma relación de reducción, o sea, la relación entre el tamaño inicial de las partículas y el tamaño final de las mismas. Esto supone que la energía requerida está relacionada directamente a la relación de reducción $\frac{L_1}{L_2}$, lo que indica que la energía requerida para fraccionar una cantidad dada de material de 50mm a 25mm de tamaño es la misma que la requerida para reducir el tamaño de 12mm a 6mm. En las ecuaciones anteriores k_R y k_K son conocidas respectivamente como constante de Rittinger y constante de Kick.

Ninguna de estas dos leyes permite un cálculo correcto de los requerimientos de energía. La ley de Rittinger es aplicable principalmente a aquella parte del proceso en la que una nueva superficie está siendo creada y mantiene correctamente para una molienda de finos donde el incremento de superficie por unidad de masa de material es grande. La ley de Kick, está más relacionada a la energía requerida para efectuar una deformación elástica antes que la fractura ocurra, y es más exacta que la ley de Rittinger para un fraccionamiento de superficies irregulares donde la cantidad de superficie producida es considerablemente baja.

1.3.2.3.LEY DE BOND E ÍNDICE DE TRABAJO.

Un método algo más realista para estimar la energía necesaria para la trituración y molienda fue propuesta por Bond en 1952. Bond postuló que el trabajo que se requiere para formar partículas de un tamaño D_p a partir de una alimentación muy grande es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie a volumen del producto, $\frac{s_p}{v_p}$ de lo cual se deduce que:

$$\frac{P}{\dot{m}} = k_b \left(\frac{1}{D_{pb}^{1/2}} - \frac{1}{D_{pa}^{1/2}} \right) \quad \text{Ec.: 1.3.2.4 – 1}$$

Siendo k_b una constante que depende del tipo de máquina y del material que se tritura. Esto es equivalente a la solución de la Ec.: 1.3.2.1-1 propuesta anteriormente para $n = 1,5$ y una alimentación de tamaño infinito. Para utilizar la Ec.: 1.3.2.4-1 se define un índice de trabajo W_{iT} , en la práctica como la energía total, en kilovatios-hora por 2000 libras de alimentación, que se necesita para reducir una alimentación muy grande hasta un tamaño tal que el 80 por 100 del producto pase a través de un tamiz de 100 μm . Esta definición conduce a una relación de k_b y W_{iT} . Si D_p está en milímetros, P en kilovatios y m en toneladas (2000 lb) por hora.

$$K_b = \sqrt{100 \times 10^{-3}} W_{iT} = 0,3162 W_{iT} \quad \text{Ec.: 1.3.2.4 – 2}$$

Si el 80 por 100 de la alimentación pasa a través de un tamaño de malla de D_{pa} mm y el 80 por 100 del producto a través de un tamaño de malla de D_{pb} mm, a partir de las 2 ecuaciones anteriores se deduce que:

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0,3162 * W_{iT} * \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right) \quad \text{Ec.: 1.3.2.4 – 3}$$

El índice de trabajo incluye la fricción en el triturador, y la potencia dada por la *Ec.*:

1.3.2.4-3 es potencia bruta.

En la Tabla 1.3.1-1 se presentan índices de trabajo típicos para algunos materiales comunes. Estos datos no varían demasiado para diferentes máquinas del mismo tipo general y son aplicables a la trituración seca o a la molienda húmeda.

El tamaño del material es tomado como el tamaño del agujero al cuadrado a través de la cual el 80% del material pasará.

1.4.SIMULACIÓN DE LAS OPERACIONES DE MOLIENDA:

La distribución de tamaños de los productos en los diferentes tipos de equipos de reducción de tamaños se puede predecir mediante una simulación por ordenador del proceso de desintegración. Con esta finalidad se utilizan dos conceptos básicos, una *función de velocidad de molienda* S_u , y una *función de rotura* ΔB_u . La función de velocidad de molienda S_u es la fracción del material de un determinado tamaño, más grueso que el retenido por el tamiz n , que se rompen en un determinado tiempo. Si x , es la fracción de masa retenida sobre uno de los tamices superiores, su velocidad de variación por rotura en tamaños más pequeños es:

$$\frac{dx_u}{dt} = -S_u * x_u \quad \text{Ec.: 1.4 - 1}$$

La función de rotura ΔB_u da la distribución de tamaños que resulta de la rotura del material superior. Parte del material de malla 4/6, después de la rotura, será bastante grueso, parte muy pequeño y parte intermedio. Probablemente, muy poco será tan grande como malla 6/8, y solamente una pequeña cantidad será tan pequeña como malla de 200. Es de esperar que estén favorecidos los tamaños intermedios.

Consecuentemente ΔB varía con n y con u . Además, varía con la composición del material contenido en el molino, puesto que las partículas gruesas pueden romperse de forma diferente en presencia de grandes cantidades de finos de lo que lo harían en ausencia de finos. Por tanto, en una carga del molino es de esperar que ΔB_u (y también S_u) varíe con el tiempo y con otras variables de molienda.

$$B_{n,u} = \left(\frac{\bar{D}_n}{\bar{D}_u} \right)^\beta \quad \text{Ec.: 1.4 - 2}$$

Si se conocen ΔB_u y S_u la velocidad de variación de cualquier fracción dada se puede calcular de la forma que se indica en la Ec.: 1.4-3. Para cualquier fracción, excepto la más gruesa, la cantidad inicial disminuye por rotura en tamaños más pequeños y simultáneamente aumenta por creación de nuevas partículas a partir de la rotura de todas las fracciones más gruesas. Si las velocidades de entrada y salida en un tamiz determinado son iguales, la fracción retenida sobre dicho tamiz permanece constante. Sin embargo, generalmente no es éste el caso, y la fracción de masa retenida sobre el tamiz n varía de acuerdo con la ecuación:

$$x_{n,t+1} = x_{n,t}(1 - S_n \Delta t) + \Delta t \sum_{u=1}^{n-1} x_{u,t} S_u \Delta B_{n,u} \quad \text{Ec.: 1.4 - 3}$$

1.5.EQUIPOS INVOLUCRADOS EN LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO, CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN.

Existe una amplia variedad de equipos para la reducción de tamaño. Las principales razones de la falta de estandarización son la variedad de sustancias que se pueden triturar y las calidades requeridas para el producto final, la limitada información útil que

se tiene de molienda y los requisitos de diferentes industrias en el balance económico entre el coste de inversión y el de operación.

El equipo se clasifica de acuerdo con la forma en que las fuerzas se aplican, de la siguiente manera:

1. Entre dos superficies sólidas: trituración o desgarramiento Fig. 1.5-1.a; cizalladura Fig. 1.5-1. b; trituración en un lecho de partículas Fig. 1.5-1.c.
2. Impacto sobre una superficie sólida Fig. 1.5-1. d, o entre partículas Fig. 1.5-1. e,
3. Por acción del medio circundante Fig. 1.5-1. f, (en molino de coloides).
4. Aplicación no mecánica de energía (choque térmico, fragmentación explosiva, electrohidráulica).

Un cascanueces, un martillo, una lima y unas tijeras constituyen ejemplos prácticos.

En la tabla 1.5-1 se presentan una clasificación práctica de los equipos de trituración y molienda. La guía para seleccionar el equipo se puede basar en el tamaño y la dureza de la alimentación como se ilustra en la tabla 2.1.5-2

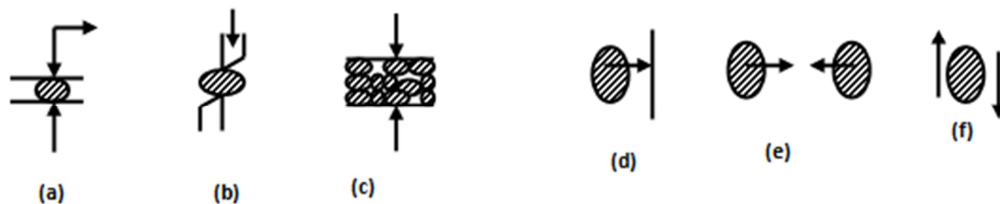


Fig. 1.5-1: Mecanismos de aplicación de fuerzas que originan la reducción de tamaño



Fig. 2 1.5-2: Ilustración del estado de esfuerzo en un sólido desde el punto de vista molecular.

Tabla 1.5-1 Equipos de trituración y molienda.

<p>Quebrantadoras de mandíbula</p> <p><i>A</i></p> <p>1. Blake</p> <p>2. Excéntrica Superior</p>	<p>Trituradoras giratorias</p> <p><i>B</i></p> <p>1. Primarias</p> <p>2. Secundarias</p> <p>3. De cono</p>	<p>Molinos de impacto para trabajos pesados</p> <p><i>C</i></p> <p>1. Rompedoras de rotor</p> <p>2. Molinos de martillos</p> <p>3. Impactores de jaulas</p>
<p>Quebrantadores de rodillos</p> <p><i>D</i></p> <p>1. Rodillos lisos (dobles)</p> <p>2. Rodillos dentados (de uno o de dos rodillos)</p> <p>3. Rodillos prensos</p>	<p><i>E</i></p> <p>Molinos de bandejas secas y de fileteado</p>	<p>Desmenuzadores</p> <p><i>F</i></p> <p>1. Desmenuzadores dentados</p> <p>2. Desintegradores de jaulas</p>
<p>Cortadoras y rebanadoras rotatorias</p> <p><i>G</i></p>	<p>Molinos con medios de molienda.</p> <p><i>H</i></p> <p>1. Molinos de bolas, piedras, varillas y compartimientos:</p> <p>2. Molinos agitados de bolas y arenal</p> <p>3. Molinos vibratorios</p>	<p>Molinos de velocidad periférica media</p> <p><i>I</i></p> <p>1. Molinos de anillo y rodillos y de taza</p> <p>2. Molinos de rodillos, tipo cereal</p> <p>3. Molinos de</p>

				rodillos, tipos para pintura y caucho
<i>J</i>	Molinos de alta velocidad periférica			Molinos hidráulicos superfinos
	1. Molinos de martillos para molienda fina			<i>K</i> 1. De chorro centrífugo
	2. Molinos de clavijas			2. De chorro opuesto
				3. De chorro con yunque

Fuente: Manual del Ingeniero Químico. PERRY, R. /GREEN, D.

Tabla 1.5-2 Guía para la selección de los equipos de trituración y molienda

Operación de reducción de tamaño	Dureza del material	Tamaño*				Relación de reducció***	Tipos de equipos
		Gama de alimentación, in **		Gama de productos, in **			
		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.		
Trituración:							
Primaria	Duro	60	12	20	4	3 a 1	A a D
		20	4	5	1	4 a 1	
Secundaria	Duro	5	1	1	0,2	5 a 1	A a F
		1,5	,25	0,185	0,03	7 a 1	
				(4)	(20)		
	Suave	20	4	2	0,4	10 a 1	C a G
Molienda:							
Pulverización:							
Gruesa	Duro	0,185	0,033	0,023	0,003	10 a 1	D a I
		(4)	(20)	(28)	(200)		
Fina	Duro	0,046	0,0058	0,003	0,00039	15 a 1	H a K
		(14)	(100)	(200)	(1250)		
Desintegración:							
Gruesa	Suave	0,5	0,065	0,023	0,003	20 a 1	F, J
Fina	Suave	0,156	0,0195	0,03	0,00039	50 a 1	I a K
		(5)	(32)	(200)	(12350)		

Fuente: Manual del Ingeniero Químico. PERRY, R. /GREEN, D.

* 85 por 100 en peso menor que el tamaño dado.

** Número de mallas entre paréntesis

*** Relaciones de reducción más altas para operaciones de circuito cerrado.

1.5.1. MOLINO DE MARTILLOS

Un **molino** es el lugar donde se produce la molienda, este equipo puede ser considerado como un “reactor” continuo donde la energía suministrada es convertida en acción mecánica de ruptura y la “reacción” obtenida es una reducción de tamaño.

El reactivo en el molino es la alimentación que en él entra, la que raramente es de un solo tamaño y normalmente tiene una distribución granulométrica completa, de manera tal, que debe considerarse como un conjunto de reactivos.

El producto es la distribución de tamaño del material que va saliendo del molino. Esta no es nunca un tamaño individual y debe utilizarse una curva o un conjunto de números para caracterizar su distribución granulométrica. Aún la fragmentación de partículas de un solo tamaño produce una completa variedad de tamaños de producto

Un molino de martillos es un molino que sirve para pulverizar y desintegrar, funcionan a altas velocidades. El eje del rotor puede ser vertical u horizontal, aunque predomina esta última modalidad. El eje sostiene los martillos, llamados a veces agitadores, y pueden ser elementos en forma de T, de estribo, barras o anillos fijos o pivotados al eje o a los discos fijos que van sobre el eje. La acción de molienda resulta de los impactos y la fricción entre los grumos o partículas del material alimentado, la cubierta y los elementos de molienda. El rotor funciona dentro de un recipiente que contiene placas o revestimientos de molienda de forma cilíndrica. La finura del producto se regula cambiando la velocidad del rotor, la velocidad de alimentación o la abertura entre los

martillos y la placa de molienda, así como cambiando la cantidad y el tipo de martillos utilizados y el tamaño de las aberturas de descarga.

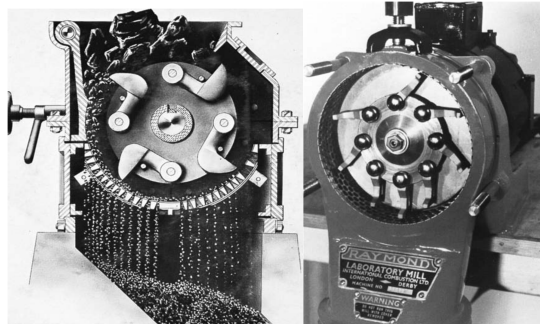


Fig. 1.5.1-1 Molino de martillos

La descarga por criba o rejilla de un molino de martillos sirve como clasificador interno. La materia prima alimentada debe ser de tipo no abrasivo, con durezas suaves. El molino es capaz de recibir alimentación de 2 cm, dependiendo del tamaño de la garganta de dosificación, y de reducirlo a un producto sustancialmente capaz en su totalidad de atravesar una malla N° 200. Entre las ventajas de uso de este tipo de molinos se encuentran su durabilidad y versatilidad, el bajo costo de mantenimiento, mantiene su eficiencia original a través de largos períodos de tiempo, provee de cierta homogeneidad en la molienda, se pueden moler ingredientes mezclados, como también muestras con relativa humedad alta. Su principal desventaja es el requerimiento alto de potencia y la menor eficiencia en la utilización de energía.

1.6.LA MOLTURABILIDAD.

La molturabilidad es la cantidad de producto de un molino en particular que satisface una especificación dada por unidad de tiempo de molienda (por ejemplo, toneladas/hora atravesando una malla 200), por lo que se lo relaciona con la velocidad

de molienda de un material para un molino en concreto. El principal propósito del estudio de la molturabilidad consiste en evaluar el tamaño, el tipo de molino que se requiere para producir un tonelaje específico y las necesidades de energía para la molienda. Hay tantas variables que afectan la molturabilidad que este concepto se utiliza sólo como una guía aproximada para dimensionar el molino, sin hacer referencia alguna a la distribución del tamaño del producto, el tipo o el tamaño del molino. Si se supone una ley de energía en particular, entonces el comportamiento de molienda de varios molinos se expresa como un coeficiente de energía o índice de trabajo. Este concepto más preciso se ve limitado por la poca adecuación de estas leyes, pero a menudo constituye la única información disponible. Entre los factores importantes que determinan la molturabilidad están la dureza, la elasticidad, la resistencia a la divisibilidad, la molturabilidad se relaciona con el módulo de elasticidad con la velocidad del sonido a través del material.

1.7. CLASIFICACIÓN DE TAMAÑOS.

Se denomina clasificación a la operación de separación de los componentes de una mezcla de partículas en dos o más fracciones de acuerdo a su tamaño, siendo cada grupo obtenido más uniforme en esta propiedad que la mezcla original. La clasificación es en algunos casos una operación primordial, especialmente cuando el producto tiene especificaciones estrictas de tamaño. En otros casos, ella es una operación auxiliar de la molienda, para aumentar la eficiencia del proceso.

En la mayoría de los casos el producto de la clasificación está constituido por dos fracciones, una integrada preferentemente por las partículas gruesas y la otra por las

partículas finas. La fracción gruesa recibe el nombre de descarga o rechazo mientras que la fracción fina se denomina rebalse o cernido. Los equipos de clasificación, o clasificadores, en general no producen una operación perfecta. Partículas de exactamente el mismo tamaño y propiedades físicas, tales como forma y densidad, recibirán una diferente acción de clasificación en el mismo equipo debido a efectos de entrada y efectos de pared del equipo y debido al efecto dispersivo del fluido (turbulencia). Aun para acciones de clasificación muy simples, la presencia de dispersión aleatoria hace difícil la predicción exacta de la separación de tamaños. Otras propiedades del material de alimentación, tales como la forma y densidad, introducen complicaciones adicionales. Finalmente, se puede reconocer que la acción de separación de las fuerzas involucradas sobre las partículas, se verifica en suspensiones densas y los actuales tratamientos teóricos de éstas no son del todo satisfactorios. Por todas estas razones los clasificadores no son equipos ideales. Por ejemplo, aún cuando en todos los clasificadores se puede distinguir el tamaño de separación como aquel para el cual todas las partículas mayores son enviadas a la descarga, ésta también recibirá siempre una cierta proporción de partículas menores.

Los varios tipos de equipos de clasificación caen en dos categorías: 1) Aquellos que utilizan la clasificación en un fluido y 2) aquellos que someten las partículas a una serie de mallas. En esta última categoría se incluyen los harneros o tamices. Estos están basados en la presentación de las partículas a superficies conteniendo aberturas uniformes. Las partículas de tamaño inferior a las aberturas de la superficie la atravesarán, separándose de las partículas mayores.

1.7.1. TAMIZADO

La separación de materiales sólidos por su tamaño es importante para la producción de diferentes productos por ejemplo. Arenas sílicas. Además de lo anterior, se utiliza para el análisis granulométrico de los productos de los molinos para observar la eficiencia de estos y para el control de molienda de diversos productos o materias primas, entre otras como: cemento, caliza, arcilla.

El tamiz consiste de una superficie con perforaciones uniformes por donde pasará parte del material y el resto del material será retenido por él. Para llevar a cabo el tamizado es requisito que exista vibración para permitir que el material más fino traspase el tamiz.

De un tamiz o malla se obtienen dos fracciones, los gruesos y los finos: la nomenclatura es la siguiente; para la malla 100, + 100 indica los gruesos y -100 indica los finos.

El tamaño de partícula es especificado por la medida reportada en malla por la que pasa o bien por la que queda retenida, el intervalo de tamaño final, que contiene el peso del material más pequeño, es definido como la fracción en peso de tamaños menores al más pequeño tamiz utilizado. Este intervalo se denomina *sumidero* ya que él recibe material fracturado de todos los tamaños mayores, pero no entrega material a ningún otro intervalo. Con estos datos se puede tener el perfil de distribución de los gránulos en el tamizador de manera gráfica. La forma gráfica es generalmente la más usada y existen muchos métodos en los que se realiza una presentación semilogarítmica, la cual es particularmente informativa.

Un molino de martillos generalmente tiene una descarga por tamiz. El objetivo de este tamiz es separar una mezcla de partículas de varios tamaños en dos corrientes, una

inferior que pasa a través del tamiz y otra superior que es rechazada por el tamiz. Cualquiera de ellas, o ambas, puede ser el producto.

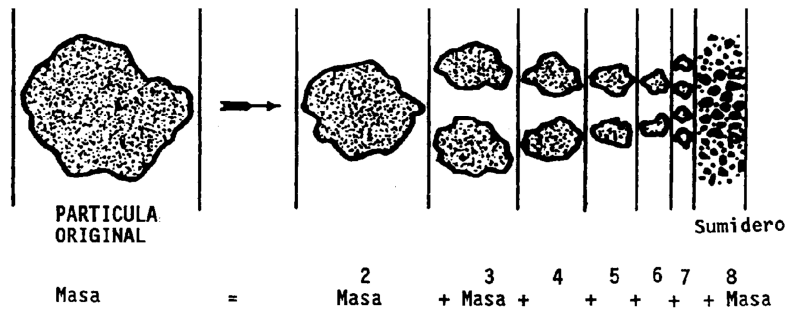


Fig. 3 1.6.1-1. Ilustración de la fracción de material fracturado desde un monotamaño que queda en un intervalo de tamaño determinado.

1.7.1.1.BALANCES DE MASAS APLICADOS A LOS TAMICES:

A un tamiz pueden aplicarse sencillos balances de materia que resultan útiles para calcular relaciones de alimentación, cernido y rechazo, a partir de los análisis por tamizado de las tres corrientes y el conocimiento del deseado diámetro de corte. Sean:

F = velocidad de flujo másico de la alimentación

D = velocidad de flujo másico de la corriente de rechazos

B = velocidad de flujo másico de la corriente de cernidos

x_F = fracción másica del material A en la alimentación

x_D = fracción másica del material A en la corriente de rechazos

x_S = fracción másica del material A en la corriente de cernidos

$$\frac{D}{F} = \frac{x_f - x_b}{x_d - x_b} \quad \text{Ec. : 1. 6. 1. 1 - 1}$$

$$\frac{B}{F} = \frac{x_D - x_F}{x_D - x_B} \quad \text{Ec. : 1. 6. 1. 1 - 2}$$

1.7.1.2.EFICACIA DE UN TAMIZ.

La eficacia de un tamiz (con frecuencia llamado *rendimiento del tamiz*) es una medida del éxito de un tamiz en conseguir una nítida separación entre los materiales **A** y **B**. Si el tamiz funcionase perfectamente, todo el material **A** estaría en la corriente superior (rechazo) y todo el material **B** estaría en la corriente inferior (cernido). Una medida frecuente de la eficacia de un tamiz es la relación entre el material **A** de tamaño superior que realmente se encuentra en la corriente superior y la cantidad de **A** que entra con la alimentación. Estas cantidades son **D_x**, y **F_x**, respectivamente. Por tanto, donde **E_A** es la eficacia del tamiz basada en el tamaño mayor. Análogamente, una eficacia **E_s** basada en el material de tamaño inferior viene dada por:

$$E_A = \frac{D_{x_D}}{F_{x_F}} \quad \text{Ec.: 1.6.1.2 - 1}$$

$$E_B = \frac{B * (1 - B_{x_B})}{F * (1 - F_{x_F})} \quad \text{Ec.: 1.6.1.2 - 2}$$

Una eficacia global se la determina como el producto entre **E_A** y **E_B**, entonces:

$$E = \frac{D_{x_D}}{F_{x_F}} \frac{B * (1 - B_{x_B})}{F * (1 - F_{x_F})} \quad \text{Ec.: 1.6.1.2 - 3}$$

Se puede definir una eficacia global combinada como el producto de las dos relaciones individuales, de forma que si su producto se representa por **E**:

$$E = \frac{(x_F - x_B)(x_D - x_F)x_D(1 - x_B)}{(x_D - x_B)^2(1 - x_F) * x_F} \quad \text{Ec.: 1.6.1.2 - 4}$$

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

CAPITULO II

2. PARTE EXPERIMENTAL

Los procedimientos empleados para el diseño del molino están basados en ensayos convencionales propuestos por la bibliografía consultada, los que se realizaron a nivel de laboratorio. Se empleó un prototipo de molino de martillos con las características básicas de un equipo de molienda, provisto de una tolva de alimentación con regulación de flujo másico, un sistema de martillos fijos, sistema intercambiable de cribas, y poleas que permitieron regular la transmisión de potencia del motor a la molienda a distinta velocidad. El equipo y sus características estructurales permitieron realizar modificaciones de ciertas variables para obtener datos de fundamental importancia en la elaboración del diseño del molino propuesto. Se realizaron pruebas de caracterización de la materia prima a la entrada del proceso de molienda basados en normas técnicas nacionales. También se realizaron ensayos importantes sobre el producto molido, se contó con una torre de tamices que nos permitieron realizar un análisis granulométrico y poder estudiar de mejor manera el comportamiento del sólido con las variaciones de las variables de proceso, y así obtener un producto de características físico-químicas ideal como yeso de construcción

Para procesar los datos se utilizaron hojas de cálculo, los mismos que son presentados en un resumen de tablas en el presente informe.

2.1.MUESTREO

Para la ejecución de las pruebas experimentales, se empleó yeso provenientes de 2 minas de yeso del Cantón Salinas, provincia de Santa Elena, y 1 mina de la parroquia de Malacatos provincia de Loja, siendo estas unas de las fuentes principales de yeso en el Ecuador.

El yeso provisto por estas minas se encuentra semiprocado incluyendo una trituración primaria, secundaria y eliminación de agua de combinación por secado, para realizar la selección del yeso con el cual se va a trabajar se realizaron análisis de humedad, granulometría, impurezas.

Dado que se seleccionó proveedores de yeso semiprocado, todos cumplieron con estándares de calidad aceptables para incluir su yeso como materia prima para los ensayos experimentales.

2.2.METODOLOGÍA

2.2.1. MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.2.1.1.MÉTODOS

Para el presente proyecto se trabajó en grupo, en forma ordenada, sistemática y responsable. Este trabajo se fundamenta en métodos teóricos y práctico – experimentales. Se inició con la recopilación de una amplia y selecta gama de fuentes de información que proporcionaron aspectos de trascendental importancia para definir conceptos, teorías, condiciones y variables de proceso, escenario en el cual se desarrollará el diseño de molienda, luego, para el desarrollo experimental se utilizó un

prototipo de molino de martillos con sistema de tamizado incorporado, práctica que arrojó datos de vital importancia, estos datos fueron tabulados e interpretados y son el complemento necesario involucrado en el diseño y construcción de este proyecto. Esta metodología tiene la finalidad de dar respuesta a las inquietudes y dudas que surjan durante el proceso de molienda del yeso.

2.2.1.1.1. INDUCTIVO

Mediante los ensayos realizados en el laboratorio se determinaron las condiciones específicas requeridas (tamaño de partícula a la entrada y salida del molino). Requerimientos que se convierten en el punto de partida para el dimensionamiento del molino y del sistema de clasificación granulométrico que transformarán al yeso pre-procesado en yeso apto para la construcción y otras aplicaciones, conforme a la norma técnica INEN 1685

Mediante tamizado en torres de tamices estándar se determinó la clasificación de partícula por tamaños a la entrada del molino siendo 30 mm el tamaño ideal para obtener los mejores resultados de molienda, pudiendo tener como variante de esta condición 30 ± 3 mm., siempre y cuando la humedad de la materia prima se encuentre en un rango inferior al 2%, para lo cual es necesario realizar un ensayo previo de humedad.

2.2.1.1.2. DEDUCTIVO

Los estudios y la realidad presente en diferentes niveles tanto internacional, nacional y local, muestran la necesidad de contar con estudios que ayuden a comprender de mejor forma la reducción de tamaño como operación unitaria con el uso de diferentes equipos

aplicados a diferentes materiales, en este caso el yeso por su difundido empleo y versátiles aplicaciones. Un estudio serio y responsable que sea complementado con el diseño y construcción de equipos de prueba y práctica que sean eficientes, de operación sencilla y seguros para el medio ambiente, pero en cuyo diseño se hayan involucrado cálculos de Ingeniería, junto con las variables que se puedan controlar y manejar a fin de obtener equipos como el de este proyecto un molino de martillos con tamiz intercambiable versátil, y que permitan continuar con la investigación científica. Este proyecto se ve complementado, con la correcta aplicación de las bases teóricas de Química Inorgánica, Operaciones Unitarias, Balances de masa, Estadística, Matemática y otras. La normalización existente nos ayudará a comparar los datos técnicos normados en función de la granulometría del yeso a fin de conseguir un producto de calidad aceptable.

2.2.1.1.3. EXPERIMENTAL.

La parte experimental de este trabajo investigativo se realizó en los laboratorios, tanto en el de Química General e Inorgánica de la Facultad de Ciencias como en el Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica, los ensayos se realizaron por duplicado a fin de tener datos lo más cercanos a la realidad.

La metodología experimental se basa en técnicas especificadas en normas de calidad vigentes y describen en esta sección.

2.2.1.2. Técnicas

El proceso técnico aplicado al yeso a fin de conseguir un producto de calidad aceptable seguido en el presente proyecto se detalla a continuación, dicho proceso no contempla

un alto grado de complejidad, pero el éxito del mismo depende del control de las variables involucradas.

Para la molienda se utilizó:

- ❖ Yeso preprocesado proporcionado por la empresa “Fibra Yeso”, deshidratado y triturado.
- ❖ Un molino de martillos (equipo prototipo) de propiedad de los tesistas, las características del mismo se detallan en la sección de datos adicionales tabla N° 2.4.2-2.
- ❖ Fundas de polietileno para guardar las muestras procesadas.

Para los análisis se requirió:

- ❖ Las instalaciones del Laboratorio de Química General e Inorgánica de la Facultad de Ciencias, el cual brinda las condiciones necesarias de infraestructura, reactivos, y personal capacitado para realizar algunos de los ensayos descritos en este informe.
- ❖ Las instalaciones del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica, para ensayos que requirieron equipos específicos.

La técnica experimental comienza con la ***recepción de la materia prima***; punto de partida del proceso donde se analizan parámetros de control como la densidad: 2.8 g/cm^3 , el diámetro de partícula que para los ensayos no fue constante, que la humedad se encuentre en un rango inferior al 2%, además de las impurezas que pudieran observarse en la muestra, siendo un buen indicativo cualitativo por ejemplo el color; un color blanco indica pureza lo contrario se puede interpretar como impurezas en el material.

Es necesario definir un flujo másico de alimentación en esta etapa, el que puede variar dependiendo del análisis que se desee realizar.

La segunda etapa la constituye la molienda propiamente dicha, en esta etapa se pone énfasis en el control de los 3 parámetros fundamentales: **La alimentación**, tiene que asegurar un flujo continuo y constante, que no sature la capacidad del molino y que garantice el cumplimiento del flujo másico de material molido. En la **molienda**, es necesario regular las revoluciones por minuto a través de las poleas y las bandas de transmisión, para los ensayos pueden oscilar entre 1000 – 2000 rpm., esta regulación depende de la granulometría que se desee ensayar y de los polvos no deseados que se generen, estas modificaciones tienen que realizarse en base a una potencia constante del prototipo de 1Hp. El molido fino es descargado a través de un tamiz, en el **tamizado** se cuenta con tamices intercambiables de diámetro conocido su elección dependerá del ensayo que se necesite estudiar.

Finalmente, las muestras molidas son recolectadas en fundas plásticas de selle hermético, son etiquetadas y enviadas al laboratorio para el respectivo análisis, teniendo la precaución de guardar una muestra de cada una de ellas para futuros análisis. Las muestras tienen que guardarse en un ambiente seco y fresco.

2.2.1.2.1. TÉCNICAS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

2.2.1.2.1.1. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO DEL YESO

2.2.1.2.1.1.1. DETERMINACIÓN DEL AGUA LIBRE.

Tabla 2.2.1.2.1.1.1-1 determinación del agua libre

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
El agua libre del yeso es aquella que no se encuentra formando parte de la molécula de CaSO_4 y puede ser eliminado sin necesidad de elevar mucho la temperatura.	<ul style="list-style-type: none">✓ Estufa✓ Balanzas✓ Cronómetro✓ Recipiente que tenga resistencia a temperatura de 45°C	<p>1.- Pesar una muestra mínima de 500g del material y colocar formando una capa delgada en un recipiente adecuado.</p> <p>2.- Secar en una estufa a la temperatura de 45°C durante dos horas, enseguida enfriar en atmósfera seca y pesar nuevamente. La pérdida en masa corresponde al agua libre.</p> <p>3.- Se calculará su porcentaje en relación a la muestra original.</p>	$\%AL = \frac{m - m_1}{m} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>AL= Agua Libre. m= Masa inicial de la muestra en g. m_1= Masa final de la muestra en gramos.</p>

2.2.1.2.1.1.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA PARA DETERMINACIONES POSTERIORES.

Tabla 2.2.1.2.1.1.2. Preparación de la muestra para determinaciones posteriores.

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CALCULOS
Una muestra homogénea asegura la distribución equitativa de las propiedades en toda su extensión	✓ Molino ✓ Balanza ✓ Tamiz ✓ Recipiente hermético	1.- La muestra referida en 2.2.1.2.1.1.1., se pulveriza hasta que pase por el tamiz de 250 μm , teniendo cuidado de no exponerla indebidamente a la humedad o a recalentamiento. 2.- Se revuelve cuidadosamente la muestra cernida y se guarda en un recipiente hermético	

2.2.1.2.1.1.3. DETERMINACIÓN DEL AGUA COMBINADA.

Tabla 2.2.1.2.1.1.3-1 Determinación del agua combinada

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
El agua combinado.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estufa. ✓ Balanzas. ✓ Cronómetro. ✓ Recipiente que tenga resistencia a temperatura de 230°C. 	<p>1.- Colocar un gramo de la muestra preparada según la técnica 2.2.1.2.1.1.2.en un crisol con tapa y tarado, secar entre 215 y 230 °C hasta masa constante. La pérdida de masa corresponde al agua combinada.</p> <p>2.- Calcular el porcentaje en relación a la muestra original, es decir, tomando en cuenta el agua libre determinada según el numeral 2.2.1.2.1.1.1.</p>	$\%AC = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times (100 - \%AL)$ <p>Siendo:</p> <p>AC= Agua Combinada.</p> <p>m₂= Masa inicial de la muestra en g.</p> <p>m₃= Masa final de la muestra en g.</p>

2.2.1.2.1.1.4. DETERMINACIÓN DEL ANHÍDRIDO CARBÓNICO.

Tabla 2.2.1.2.1.1.4. Determinación del anhídrido carbónico

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
El Anhídrido Carbónico es absorbido y retenido por la cal sodada.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estufa. ✓ Balanzas. ✓ Cronómetro. ✓ Recipiente que tenga resistencia a temperatura de 230°C. 	<p>1.- El residuo obtenido en el ensayo 2.2.1.2.1.1.2., se coloca en el frasco (B)</p> <p>2.- Humedecer con agua destilada.</p> <p>3.- Conectar por un lado a través de una llave con un tubo U que contiene cal sodada (A)</p> <p>4.- Conectar por el otro lado de un tubo U lleno de Cloruro de Calcio anhidro (CaCl₂) (C) al cual sigue otro con una cantidad determinada de cal sodada en D. La ilustración del equipo se encuentra descrita en el anexo II de este informe.</p>	$\%CO_2 = \frac{m_{CS2} - m_{CS1}}{m_2 + 5(\%AL + \%AC)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>CO₂= Anhídrido Carbónico.</p> <p>m_{CS2}= Masa final de cal sodada en el tubo D en g.</p> <p>m_{CS1}= Masa inicial de cal sodada en el tubo D en g.</p> <p>m₂= masa de la muestra en B en g.</p> <p>AL= Agua libreen %.</p> <p>AC= Agua combinada en %.</p>

2.2.1.2.1.1.5. DETERMINACIÓN DEL SÍLICE Y MATERIAS INSOLUBLES.

Tabla 2.2.1.2.1.1.5. Determinación del sílice y materias insolubles.

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
La materia insoluble y la sílice no son disueltas por el ácido clorhídrico, esta propiedad se aprovecha en este ensayo.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaso de precipitación ✓ Probeta. ✓ Cronómetro. ✓ Mufla ✓ Estufa ✓ Balanza ✓ Embudo 	<p>1.- Pesar 0.5g de la muestra obtenida según el numeral 2.2.1.2.1.1.2., en un vaso de precipitación. Añadir alrededor de 25 cm³, de HCl (1:5) y evaporar hasta sequedad. Enfriar, agregar HCl (d=1.19) hasta humedecer completamente la muestra. Evaporar hasta sequedad y calentar hasta 120°C durante una hora. Enfriar, humedecer con HCl y agregar alrededor de 20 cm³ de agua, hervir, filtrar a través de un papel filtro libre de cenizas y lavar hasta eliminar completamente los cloruros.</p> <p>2.- Colocar el filtrado dentro del mismo vaso. Evaporar a sequedad, enfriar, humedecer con HCl concentrado, evaporar a sequedad y calentar alrededor de los 120°C durante una hora. Enfriar, agregar HCl (d=1.19) hasta humedecer completamente la muestra y añadir 25 cm³</p>	<p>%SiMi</p> $= \frac{m_4 - m_3}{m_3 + 5(\%AL)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>SiMi= Sílice (SiO₂). Y materias insolubles</p> <p>m₄= Masa final de la muestra en g.</p> <p>m₃= Masa inicial de la muestra en g.</p> <p>AL= Agua libre en %</p>

		<p>de agua. Hervir, filtrar y lavar hasta eliminar completamente los cloruros.</p> <p>3.- Colocar los papeles que contienen los dos precipitados al mismo crisol y calcinar hasta masa constante. La masa del residuo calcinado corresponde a la materia insoluble y a la sílice.</p> <p>4.-Calcular el porcentaje de estas materias con respecto a la muestra original, es decir, tomando en cuenta el agua libre determinada en 2.2.1.2.1.1.1.</p>	
--	--	--	--

2.2.1.2.1.1.6. DETERMINACIÓN DEL ÓXIDO DE HIERO Y ALUMINIO.

Tabla 2.2.1.2.1.1.6. Determinación del óxido de hierro y aluminio.

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
Se procede a oxidar completamente el hierro presente en la muestra y en medio alcalino se hace precipitar los óxidos de hierro y los de aluminio.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaso de precipitación ✓ Probeta. ✓ Cronómetro. ✓ Mufla ✓ Estufa ✓ Balanza ✓ Embudo ✓ PHmetro 	<p>1.- Al filtrado obtenido mediante la técnica 2.2.1.2.1.1.5., agregar unas gotas de ácido nítrico y hervir hasta la completa oxidación del hierro.</p> <p>2.- Agregar 2 g de cloruro de amonio disuelto en agua, seguidamente se alcaliniza con hidróxido de amonio. Digerir la mezcla en caliente durante unos pocos minutos hasta que el precipitado se coagule. Filtrar, lavar, secar, calcinar y pesar el precipitado como óxido de hierro + óxido de aluminio.</p>	$\%Fe_2O_3 + Al_2O_3 = \frac{m_5}{m_3 + 5(\%AL)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>$\%Fe_2O_3 + Al_2O_3$ = Oxido de hierro más Oxido de Aluminio en %</p> <p>m₅= Masa final de la muestra en g.</p> <p>m₃= Masa inicial de la muestra del ensayo 2.3.1.1.5. en g.</p> <p>AL= Agua libre en %</p>

2.2.1.2.1.1.7. DETERMINACIÓN DEL ÓXIDO DE CALCIO

Tabla 2.2.1.2.1.1.7. Determinación del óxido de calcio

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
Primero se precipita el óxido de calcio presente en la muestra que luego se obtiene por calcinación.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaso de precipitación ✓ Probeta. ✓ Cronómetro. ✓ Mufla ✓ Estufa ✓ Balanza ✓ Embudo ✓ Crisol de platino 	<p>1.- Calentar el filtrado obtenido mediante la técnica 2.2.1.2.1.1.6., añadir 5 gotas de oxalato de amonio. Digerir en caliente por 30 minutos asegurándose de que la solución se mantenga siempre alcalina con hidróxido de amonio.</p> <p>2.- Filtrar el precipitado, lavar, secar y calcinar a 1000 °C en un crisol de platino hasta masa constante.</p>	$\%CaO = \frac{m_6}{m_3 + 5(\%AL)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>%CaO= Oxido de Calcio en %</p> <p>m₆= Masa final de la muestra en g.</p> <p>m₃= Masa inicial de la muestra del ensayo 2.3.1.1.5. en g.</p> <p>AL= Agua libre en %</p>

2.2.1.2.1.1.8. DETERMINACIÓN DEL ÓXIDO DE MAGNESIO

Tabla 2.2.1.2.1.1.8. Determinación del óxido de magnesio

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
Primero se precipita el óxido de calcio presente en la muestra que luego se obtiene por calcinación.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaso de precipitación ✓ Probeta. ✓ Cronómetro. ✓ Mufla ✓ Estufa ✓ Balanza ✓ Embudo ✓ Crisol Gooch 	<p>1.- Al filtrado obtenido en 2.2.1.2.1.1.7., añadir suficiente agua para dar un volumen total de unos 600 cm³, enfriar y añadir 10cm³ de hidróxido de amonio y 5 gotas de fosfato ácido de sodio y amonio disuelto en agua, agitar vigorosamente hasta que la precipitación comience a formarse, dejar en reposo toda la noche.</p> <p>2.-Filtrar, utilizando un crisol Gooch y lavar con una solución de nitrato de amonio, calcinar y pesar.</p>	$\%MgO = \frac{m_7(0.36207)}{m_3 + 5(\%AL)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>%MgO= Oxido de Magnesio en %</p> <p>m₇= Masa final de la muestra en g.</p> <p>m₃= Masa inicial de la muestra del ensayo 2.3.1.1.5. en g.</p> <p>AL= Agua libre en %</p>

2.2.1.2.1.1.9 .DETERMINACIÓN DEL ANHÍDRIDO SULFÚRICO

Tabla 2.2.1.2.1.1.9. Determinación del anhídrido sulfúrico

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
Se utiliza la formación de un precipitado con cloruro de bario con el cual reacciona el SO ₃	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaso de precipitación ✓ Probeta. ✓ Cronómetro. ✓ Mechero Bunsen ✓ Balanza ✓ Embudo 	<p>1.- Disolver 0.5 g de la muestra preparada en 2.2.1.2.1.1.2., en 50 cm³, de HCl (1:5) y hervir</p> <p>2. Agregar 100 cm³ de agua hirviente, continuar la ebullición durante 5 minutos; inmediatamente filtrar y lavar con agua caliente.</p> <p>3. Hervir el filtrado y, durante esta operación, agregar 20 cm³ de una solución hirviente de cloruro de bario. Mantener en caliente la mezcla durante una hora el tiempo suficiente hasta que el precipitado se decante.</p> <p>4. Filtrar y lavar. Secar cuidadosamente y calcinar sobre un mechero Bunsen a la temperatura más baja posible hasta que el papel filtro se hay quemado. A continuación calcinar al rojo vivo durante quince minutos y pesar.</p>	<p>%SO₃</p> $= \frac{(m_1 - m_2)0.34297}{m_1 + 5(\%AL)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>%SO₃=Anhídrido Sulfúrico en %</p> <p>m₁= Masa inicial de la muestra en g.</p> <p>m₂= Masa final de la muestra en g.</p> <p>AL= Agua libre en %.</p>

2.2.1.2.1.1.10. DETERMINACIÓN DEL CLORURO DE SODIO

Tabla 2.2.1.2.1.1.10. Determinación del cloruro de sodio

FUNDAMENTO	MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULOS
Se utiliza la reacción entre el cloruro de sodio y el nitrato de plata para formar cloruro de plata precipitado que identifica la presencia en general de cloruros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vaso de precipitación ✓ Probeta. ✓ Equipo de titulación ✓ Gotero ✓ Balanza ✓ Embudo 	<p>1.- Disolver 1 g de la muestra preparada en 2.2.1.2.1.1.2., hervir con agua durante 5 minutos, filtrar y lavar con 250 cm³ de agua hirviente</p> <p>2. Agregar al filtrado 2 a3 gotas de cromato potásico, y titular con nitrato de plata 0.05N. Un cm³ de AgNO₃ es equivalente a 0.002923g de cloruro de sodio.</p>	$\%NaCl = \frac{(V_{c_1}) \times 0.002923}{m_1 + 5(\%AL)} \times 100$ <p>Siendo:</p> <p>%NaCl=Cloruro de Sodio en %</p> <p>m₁= Masa inicial de la muestra en g.</p> <p>V_{c1}=Volumen consumido de AgNO₃.</p> <p>AL= Agua libre en %.</p>

2.3.DATOS EXPERIMENTALES

DIAGNÓSTICO

Se realizaron los diversos análisis expuestos anteriormente con la finalidad de determinar la calidad del yeso como materia prima para la molienda, encontrando porcentajes bajos de contaminantes según las normas técnicas vigentes, los parámetros que pudieran causar inconvenientes en la molienda son básicamente: los que pudieran ocasionar que se incremente drásticamente la dureza del material como son la sílice, óxidos metálicos, los que pudieran generar rechazo en la calidad del producto terminado siendo impurezas como tierra, arcillas, estas últimas pueden ocasionar que la materia prima se torne dúctil antes que frágil y se incremente el gasto energético en la molienda.

Luego de realizar los análisis sobre la materia prima se procedió a la molienda en el molino prototipo encontrándose muy buenos resultados en cuanto a reducción de tamaño, las tablas expuestas a continuación así lo dictan, es tan buena la reducción de tamaño que surgió un nuevo inconveniente la emisión de polvos al ambiente, esta dificultad tiene que ser superada en el nuevo diseño del equipo de molienda, los datos que se recogen de la tabla es que a mayor velocidad aumenta la cantidad de finos y aumenta la velocidad de molienda, se tendrá que ajustar esta velocidad para encontrar un equilibrio entre la cantidad de finos y la velocidad de molienda.

Una característica adicional que cabe recalcar es la capacidad de producción de este tipo de molinos, si la alimentación es continua este molino puede dar como resultado grandes volúmenes de producción, de granulometría conocida y de buena calidad ya que el circuito es cerrado y no permite contaminación de la materia prima.

El yeso, material seleccionado para este estudio tiene un pH de 6, esta característica ácida obliga a realizar un buen plan de mantenimiento para el equipo; además el producto molido se caracteriza por absorber agua del medio ambiente razón por la cual es necesaria la implementación de un plan estratégico para almacenamiento del producto molido

2.3.1. DATOS

2.3.1.1. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL YESO COMO MATERIA PRIMA.

Tabla 2.3.2.1 - 1 Ensayos Químicos para el yeso crudo

Substancia	Porcentaje %	Valor de referencia *
Agua libre	15.6	20.9
Agua combinada	16	17.1
Anhídrido carbónico (CO ₂)		
Sílice (SiO ₂) y materiales insolubles	15	39.3
Óxidos de hierro y aluminio Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0.08	0.12
Óxido de calcio (CaO)	30	33.3
Óxido de Magnesio (MgO)	4.0	4.1
Anhídrido sulfúrico (SO ₃)	25	39.3
Cloruro de sodio (NaCl)	1.8	2.5

*Referencias obtenidas de Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.

Tabla 2.3.2.1 – 2 Ensayos Químicos para el yeso molido

Substancia	Porcentaje %	Valor de referencia *
Agua libre	0%	<0,5
Agua combinada	2%	<1
Anhídrido carbónico (CO ₂)	0.015%	<1
Sílice (SiO ₂) y materiales insolubles	0.012%	<1
Óxidos de hierro y aluminio Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0.0012%	<1
Óxido de calcio (CaO)	2%	<1
Óxido de Magnesio (MgO)	0.6%	<1
Anhídrido sulfúrico (SO ₃)	0.3%	<1
Cloruro de sodio (NaCl)	1%	<1
TOTAL		--

*Referencias obtenidas de Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.

Tabla 2.3.2.1-3 Ensayos Físicos del yeso crudo

Substancia	Unidad	Resultado	Valor de referencia *
Tiempo de fraguado*	Min	8	2 – 15
Resistencia a la compresión **	MPa	9	8 – 9
Finura **	% residuo en tamiz 212um	15	15 – 30

**Este parámetro es aplicado al yeso de lento fraguado*

*** En estos rangos están comprendidos los valores aplicados a los tres tipos de yesos especificados en la Norma Técnica INEN 1685*

2.3.1.2.DATOS DE TIEMPOS DE MOLIENDA EN FUNCIÓN DE LA ALIMENTACIÓN EN EL MOLINO PROTOTIPO

Tabla 2.3.2.2-1 Datos de tiempos de molienda para diferentes cargas en el molino prototipo.

Carga (kg)	Producto (kg)	Residuo (kg)	Abertura de malla (µm)	Tiempo (min)
0,500	0,465	0,035	1000,0	0,25
1,000	0,910	0,080	1000,0	0,33
1,500	1,420	0,080	1000,0	0,42
2,000	1,920	0,080	1000,0	0,50

Fuente: Tesistas.

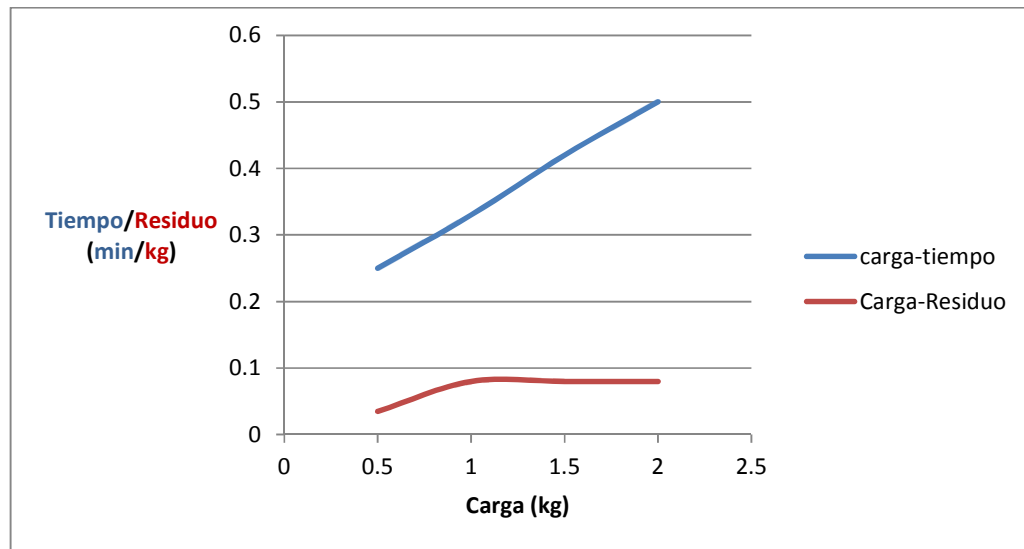


Fig. 2.3.2.2-1 Datos de tiempos de molienda, y residuos dentro de la cámara de molienda para diferentes cargas en el molino prototipo

De la figura expuesta se puede observar que el tiempo consumido en la molienda es directamente proporcional a la carga que se introduce en el molino; en tanto que el residuo para el molino de martillos prototipo se torna constante para el valor de 0,08kg a partir de cargas mayores a 1kg, ya que como se observa en la figura la curva no varía a lo largo del eje Y, sino por el contrario se grafica una línea paralela al eje x a partir de 1 kg de carga.

2.3.2.3. DATOS EXPERIMENTALES DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE LA MOLIENDA DE YESO.

Tabla 2.3.2.3-1 Datos de análisis granulométrico realizados en equipo prototipo

<u><i>N° de prueba</i></u>	<u><i>Velocidad rpm</i></u>	<u><i>Alimentación n (cm)</i></u>	<u><i>Tiempo de proceso(min)</i></u>	<u><i>Masa de entrada a (g)</i></u>	<u><i>Masa de salida (g)</i></u>	<u><i>Residuo o (g)</i></u>	<u><i>% φ(μm)</i></u>									<u><i>Total</i></u>
							<u><i>850</i></u>	<u><i>425</i></u>	<u><i>300</i></u>	<u><i>212</i></u>	<u><i>150</i></u>	<u><i>106</i></u>	<u><i>53</i></u>	<u><i>38</i></u>	<u><i>menor a 38</i></u>	
1	1253	5,90	0,35	2500	1625	875	0,89	25,45	26,68	36,14	9,61	1,23	0,00	0,00	0,00	100,00
2	1253	5,90	0,50	2500	2425	75	1,59	19,94	16,72	9,42	9,93	10,50	10,21	9,31	12,38	100,00
3	1740	4,30	0,35	1008	917	91	0,72	9,16	10,23	13,56	12,37	10,49	13,28	13,62	16,57	100,00
4	1740	4,40	0,35	1019	935	84	0,66	7,41	10,54	16,82	14,23	7,68	12,61	11,54	18,51	100,00
5	2071	4,45	0,35	1026	960	66	0,15	7,78	10,24	9,31	9,78	10,50	11,59	17,26	23,39	100,00
6	2071	2,00	0,25	500	500	0	0,12	5,61	6,65	7,43	10,88	11,45	12,91	18,73	26,22	100,00

Tabla 2.3.2.3-2 Datos acumulativos de molienda de yeso con igual velocidad a diferente diámetro de alimentación

Velocidad de operación	Diámetro de alimentación (cm)	Abertura de tamiz (μm)								
		850	425	300	212	150	106	53	38	37
2071	4,00	0,15	7,93	18,17	27,48	37,26	47,76	59,35	76,61	100
	2,00	0,12	5,73	12,38	19,81	30,69	42,14	55,05	73,78	100

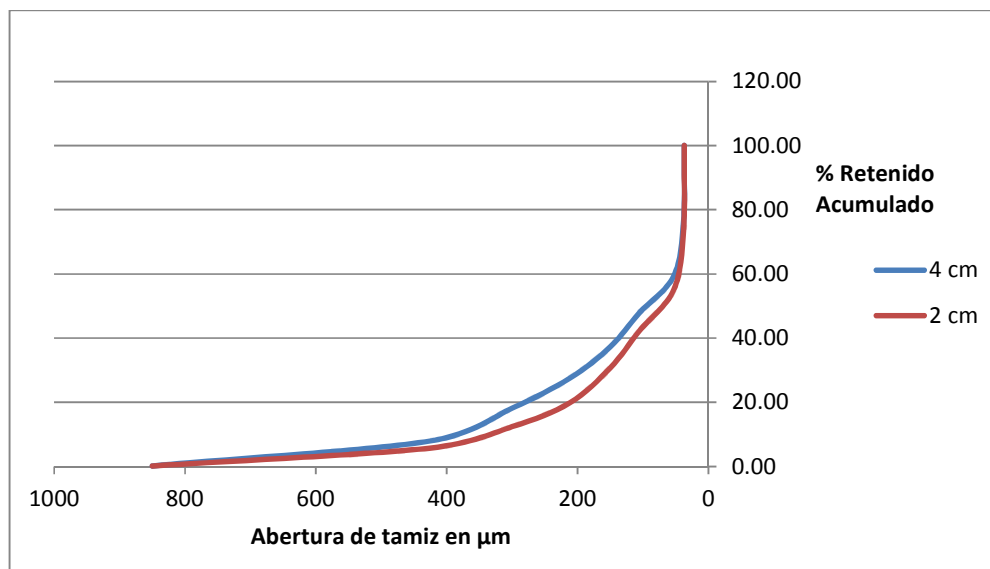


Fig. 2.3.2.3-1 Análisis granulométrico de la molienda del yeso a igual velocidad (2071 rpm) pero con diferentes diámetros de alimentación

En esta figura se puede apreciar que el porcentaje de sólidos de diámetros pequeños o polvos finos se ve favorecido por un diámetro pequeño de partícula en este caso de 2 cm, en tanto que para sólidos de 4 cm se favorece el apareamiento de partículas grandes lo que disminuye la eficiencia del tamiz y del proceso de molienda en general.

Tabla 2.3.2.3-3 Datos acumulativos de la molienda de yeso con igual velocidad a diferentes tiempos de molienda

Velocidad de operación (rpm)	Tiempo de molienda (s)	Abertura de tamiz (μm)								
		850	425	300	212	150	106	53	38	37
1253	20	0,89	26,34	53,02	89,16	98,77	100	100	100	100
	30	1,59	21,53	38,25	47,67	57,6	68,1	78,31	87,62	100

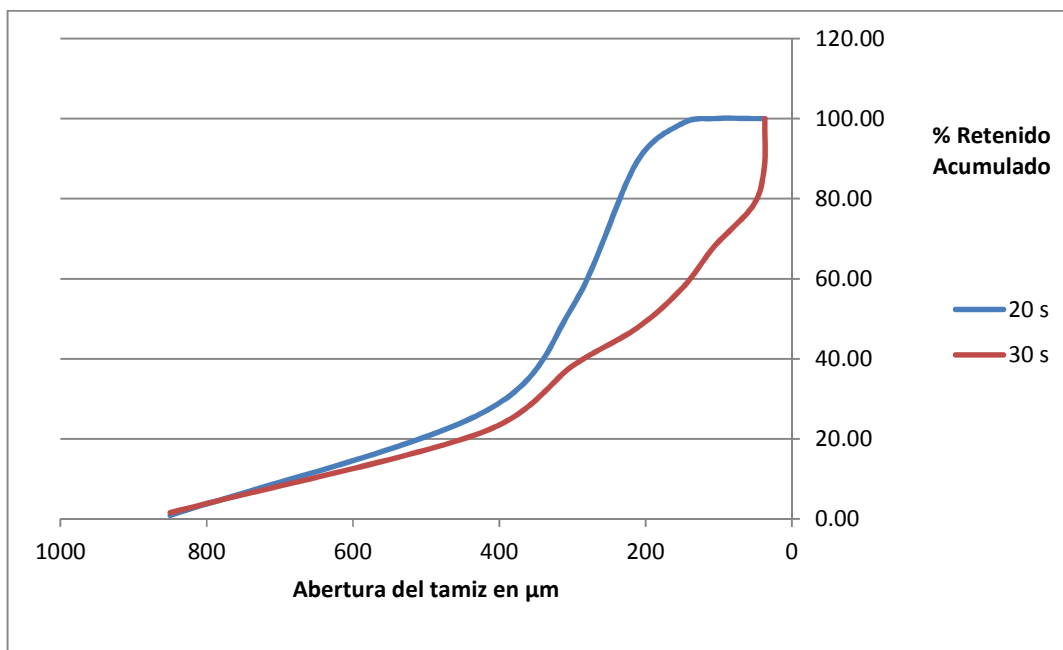


Fig. 2.3.2.3-2 Análisis granulométrico de la molienda del yeso con la misma velocidad (1253 rpm) pero a diferente tiempo de molienda

Otro factor a considerar es el tiempo de permanencia del material en la cámara de molienda; se observa claramente que el apareamiento de partículas finas se ve favorecido por un mayor tiempo de permanencia del material dentro de la cámara, no

obstante es imperativo que se cuantifique el tiempo exacto de permanencia dentro de esta cámara ya que como se analizó anteriormente para este proceso de molienda va a existir un residuo, el cual seguirá absorbiendo la energía del molino y no pasará a través del tamiz.

Tabla 2.3.2.3-4 Datos acumulativos de la molienda del yeso con igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidad

Velocidad de operación	Diámetro de alimentación (cm)	Abertura de tamiz (μm)								
		850	425	300	212	150	106	53	38	37
1740	4,40	0,66	8,07	18,61	35,43	49,66	57,34	69,95	81,49	100
2071		0,15	7,93	18,17	27,48	37,26	47,76	59,35	76,61	100

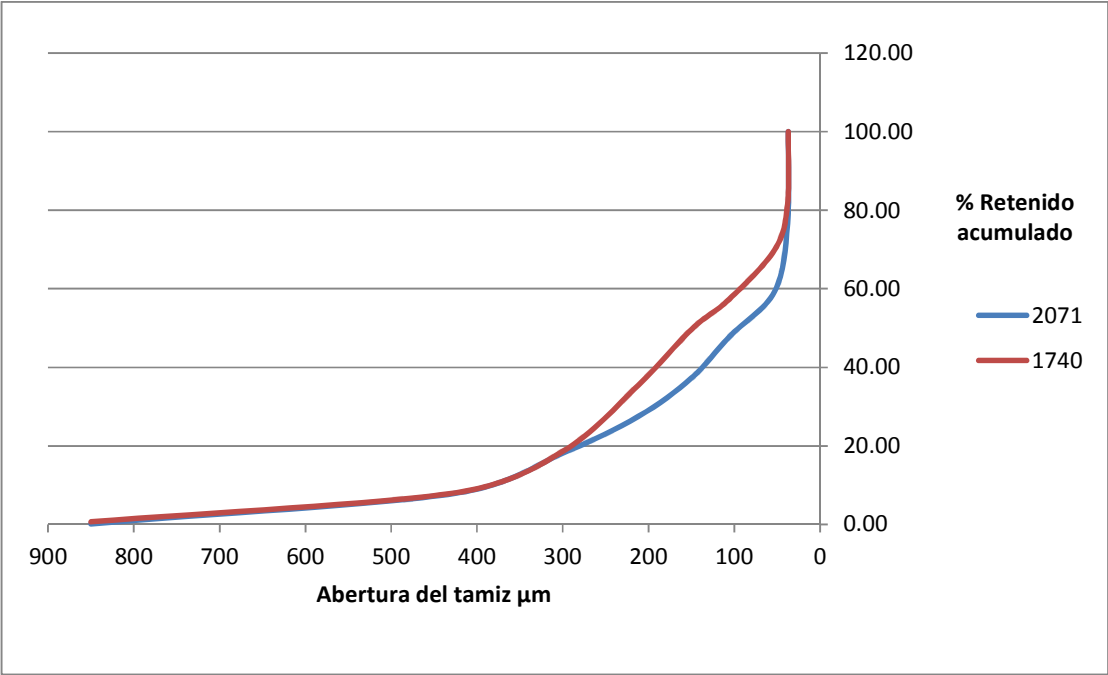


Fig. 2.3.2.3-3 Análisis granulométrico del yeso con el mismo diámetro de alimentación (4,5 cm) pero con velocidades diferentes

De este gráfico se evidencia claramente que el proceso de molienda en un molino de martillos se ve favorecido por velocidades altas, la curva en azul muestra que a la máxima velocidad del molino prototipo que son 2071 rpm existe una mayor cantidad de partículas inferiores a las 200 micras, en tanto que para una velocidad de 1740 rpm hay mayor cantidad de partículas con diámetros superiores a las 300 micras, en relación a las que existen a una velocidad de 2071 rpm.

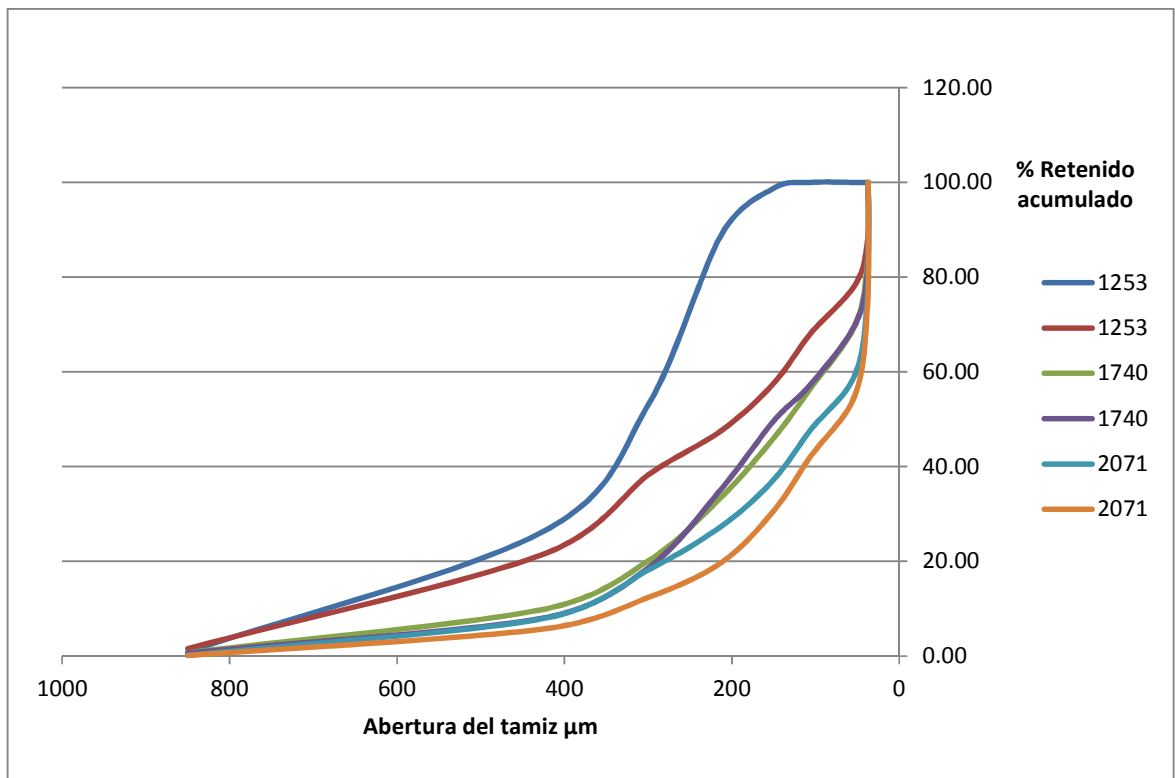


Fig. 2.3.2.3-4 Análisis granulométrico de la molienda del yeso a diferentes velocidades de molienda

Esta gráfica es un resumen del análisis granulométrico del yeso molido en el molino prototipo, donde se ensayaron las diferentes variables de proceso y en la cual se puede observar que la eficiencia del proceso se ve mejorada por el uso de velocidades altas, diámetros de partícula a moler pequeños, y tiempos relativamente largos de molienda.

2.4.DATOS ADICIONALES

2.4.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MOTOR UTILIZADO PARA EL PROTOTIPO DE MOLINO

Tabla 2.4.1-1 Características del motor del prototipo de molino.

Característica	Unidad	Valor
Potencia	HP	1
	kW	0,75
Velocidad tangencial	rpm	1740
Corriente nominal a 110	A	14
Voltaje	V	110

Fuente: Tesistas.

2.4.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE PROTOTIPO DE MOLINO.

Tabla 2 2.4.2-1 Material de construcción del prototipo de molino.

Estructura	Material de construcción
Carcasa	Hierro forjado al 0,10% de Carbono
Eje	Acero de transmisión
Martillos	Hierro forjado al 0,10% de Carbono
Base	Fundición gris con grafito en láminas
Poleas	Aluminio

Fuente: Tesistas.

Tabla 2.4.2-2 Características del prototipo de molino.

Sección del molino	Característica	Unidad	Valor
Motor eléctrico	Potencia de trabajo	HP	1
		Kw	0,75
Sistema de transmisión	Velocidades tangenciales	rpm	556,8
		rpm	1148,4
		rpm	2636,4
		rpm	1740,0
	Diámetros de poleas	mm	26,0
		mm	53,0
		mm	80,0
Carcasa	Diámetro interno	mm	300,0
	Longitud interna	mm	205,0
	Espesor	mm	3,0
Martillos	Nº de martillos	---	14,0
	Espesor	mm	8,0
	Longitud	mm	135,0
	Ancho	mm	33,0
Eje	Diámetro	mm	30,0
	Longitud	mm	205,0
Tamiz	Diámetro del agujero	mm	1,0
	Espacio entre agujeros	mm	3,0
	Área de la placa	mm ²	164

Fuente: Tesistas.

CAPÍTULO III

DISEÑO Y

CONSTRUCCIÓN

CAPITULO III

3. DISEÑO.

3.1.CÁLCULOS DE INGENIERÍA

3.1.1. CÁLCULO DE LA MOLTURABILIDAD DEL MOLINO.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el prototipo de molino de martillos y conforme a la definición de molturabilidad tendríamos:

$$M_t = \frac{m_p}{t_m} \times 60$$

Donde:

M_t = Molturabilidad (kg/min).

m_p = Masa de producto que pasa a través del tamiz designado (kg).

t_m = Tiempo en que producto pasa por tamiz designado (min).

60 = Factor de conversión de min a horas (adimensional)

$$M_t = \frac{1,13}{0,50} \times 60$$

$$M_t = 135,6 \frac{kg}{h} \text{ que atraviesa la malla de } 1000 \mu m$$

3.1.2. CALCULO DE POTENCIA NECESARIA PARA LA MOLIENDA

3.1.2.1.DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA SEGÚN EL MÉTODO DE BOND.

Para ello aplicamos la ley propuesta por bond, y esta es:

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0,3162 * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right)$$

Donde:

Pm= Potencia del molino (kW)

Wi= Índice de trabajo relacionado con kb (kW.h/ton)

Dpa= Diámetro del 80% de la alimentación(mm).

Dpb= Diámetro del 80% de la producto (mm).

Datos:

P= ?(kW)

Wi= 6,73 (kW.h/ton)

Dpa= 30(mm).

Dpb= 0,212 (mm).

m= 300 lb/h

2000= Factor de conversión de toneladas a lb

$$P = \frac{300 \times 0,3162 \times 6,73}{2000} \times \left(\frac{1}{\sqrt{0,212}} - \frac{1}{\sqrt{30}} \right)$$

$$P = 0,6748 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ HP}}{0,7457 \text{ kW}} = \mathbf{0,905HP}$$

3.1.2.2.CORRECCIÓN DE LA POTENCIA DE MOLIENDA

La potencia obtenida es la potencia mecánica necesaria para satisfacer la necesidad de producción.

Para determinar la potencia eléctrica del motor se utilizará:

$$P_{el\acute{e}ct} = \frac{P}{n_{el\acute{e}ctrica} \times n_{mec\acute{a}nica}} * n_c$$

Donde:

$P_{el\acute{e}ct}$ = Potencia eléctrica del motor en HP

$n_{el\acute{e}ct}$ = Eficiencia eléctrica del motor 0,6 – 0,8 (0,8 asumida)

$n_{mecánicat}$ = Eficiencia mecánica asumida 0,8

n_c = Coeficiente de seguridad: 2

$$P_{el\acute{e}ct} = \frac{0,8573}{0,8 \times 0,8} \times 2$$

$$P_{el\acute{e}ct} = 2,83 \text{ HP}$$

3.1.3. CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE ROTACIÓN DEL MOLINO

Para ello aplicamos la siguiente relación:

$$\frac{d_{pmolino}}{v_{molino}} = \frac{d_{pmotor}}{v_{motor}}$$

Donde:

d_{pmotor} = Diámetro de la polea del motor (mm)

$d_{pmolino}$ = Diámetro de la polea del molino (mm)

v_{motor} = Velocidad de rotación del motor (rpm).

v_{molino} = Velocidad de rotación del molino (rpm).

Datos:

$$d_{pmotor} = 80 \text{ mm}$$

$$d_{pmolino} = 130 \text{ mm}$$

$$v_{motor} = 3450 \text{ rpm.}$$

$$v_{molino} = ?$$

$$\frac{d_{pmolino}}{v_{molino}} = \frac{d_{pmotor}}{v_{motor}}$$

$$\frac{v_{motor} \times d_{pmolino}}{d_{pmotor}} = v_{molino}$$

$$v_{molino} = 2112 \text{ rpm}$$

De esta manera para los diferentes diámetros de la polea del motor, tenemos las siguientes posibles velocidades:

Tabla 3.1.3. - 1 Velocidades de operación del molino

Diámetro de polea motor (mm)	Diámetro polea molino (mm)	Velocidad resultante (rpm)
57	130	1520
67	130	1774
80	130	2112

3.1.4. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DEL MOLINO

Para ello aplicamos la ley propuesta por kick, y esta es:

$$\frac{P}{\dot{m}} = C_m \times \ln \frac{d_{pa}}{d_{pb}}$$

Donde:

P= Potencia del molino (kW)

C_m= Constante del molino (kW.h/ton)

\dot{m} = flujo másico (kg/h)

d_{pa}= Diámetro del 80% de la alimentación (mm).

d_{pb}= Diámetro del 80% del producto (mm).

Datos:

P= 4,02 kW

C_m= ?

m= 136,05 kg/h

d_a= 35 mm

d_b= 0,212 mm

1000= factor de conversión de kilogramos a toneladas.

$$C_m = \frac{P}{m \times \ln \frac{d_a}{d_b}}$$

$$Cm = \frac{4,02}{136,05 \times \ln \frac{35}{0,212}} \times 1000$$

$$Cm = 5,78 \text{ kw.h/ton}$$

3.1.5. ECUACIONES DE SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOLIENDA:

3.1.5.1.DETERMINACIÓN DEL VALOR DE S PARA EL PRIMER TAMIZ.

Con los resultados obtenidos en los datos experimentales, tenemos que para el tamiz de apertura de malla 3mm ha sido retenido un 16,3% de material (esto es $x=0,163$), y que después de un tiempo de 10 segundos esa fracción se habrá reducido a 0,5%, de tal manera que

$$\frac{dx_u}{dt} = -S_u * x_u$$

$$\int_{t_i}^{t_f} dt = \int_{x_i}^{x_f} \frac{d(x_1)}{x_1}$$

Integrando la ecuación, y despejando la función de velocidad de molienda, tenemos:

$$S_u = \ln \left(\frac{x_i}{x_f} \right) * \frac{1}{t_f}$$

Datos:

$$x_i = 0,163$$

$$x_f = 0,010$$

$$t_i = 60 \text{ s}$$

$$S_1 = \ln \left(\frac{0,163}{0,01} \right) * \frac{1}{60}$$

$$S_1 = 0,0465 \text{ s}^{-1}$$

3.1.5.2.DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE DE VELOCIDAD DE MOLIENDA DE LOS TAMICES SUBSIGUIENTES.

Para la determinación de los valores de S de los tamices subsiguientes se emplea la ecuación:

$$S_n = S_u * \left(\frac{D_n}{D_u}\right)^3$$

$$S_2 = S_1 * \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

$$S_2 = 0,0465 * \left(\frac{2,00}{3,00}\right)^3$$

$$S_2 = 0,0138 \text{ s}^{-1}$$

Siguiendo este esquema conseguimos el resto de valores para la función de velocidad de molienda para cada uno de los tamices, y los cuales están representados en la siguiente tabla:

Tabla 3.1.5.2-1 Funciones de velocidad de molienda de los diferentes de tamices

<i>n o u</i>	<i>D</i>	<i>Fracción del tamiz</i>	<i>Sn o Sux10-3 (s⁻¹)</i>
--------------	----------	-------------------------------	--------------------------------------

1	3,3500	0,1630	46,5194
2	2,0000	0,1320	9,8990
3	1,4000	0,2650	3,3953
4	0,8500	0,2340	0,7599

3.1.5.3.DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE ROTURA

La función de rotura depende de la relación (D_n/D_u) , entonces tenemos:

$$B_{n,u} = \left(\frac{\bar{D}_n}{\bar{D}_u} \right)^\beta$$

Para $\beta=1,3$

n= Tamiz superior

u= tamiz inferior

$$B_{2,1} = \left(\frac{\bar{D}_2}{\bar{D}_1} \right)^{1,3}$$

$$B_{2,1} = \left(\frac{2,00}{3,35} \right)^{1,3}$$

$$B_{2,1} = 0,511$$

La diferencia de la función de rotura será:

$$\Delta B_{n,u} = B_{n-1,u} - B_{n,u}$$

$$\Delta B_{2,1} = B_{1,1} - B_{2,1}$$

$$\Delta B_{2,1} = 0,489$$

De esta manera podemos calcular el resto de funciones de roturas y las representamos en la siguiente tabla:

Tabla 3.1.5.3-1 Funciones de rotura del proceso de molienda

<i>u</i>	<i>B_{n,u}</i> , <i>ΔB_{n,u}</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
<i>1</i>	1	0,51142358	0,32167	0,16815
	0	0,48857642	0,18976	0,15352
<i>2</i>	0	1	0,62897	0,32878
	0	0	0,37103	0,30019
<i>3</i>	0	0	1	0,52273
	0	0	0	0,47727
<i>4</i>	0	0	0	1
	0	0	0	0

3.1.5.4.DETERMINACIÓN DE LAS FRACCIONES DE MASAS

RETENIDAS EN LOS TAMICES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE MOLIENDA (SIMULACIÓN)

$$x_{n,t+1} = x_{n,t}(1 - S_n\Delta t) + \Delta t \sum_{u=1}^{n-1} x_{u,t} S_u \Delta B_{n,u}$$

Para n=1, ΔB = 0, por lo que la ecuación queda:

$$x_{1,t+1} = x_{1,t}(1 - S_1\Delta t)$$

Para este caso:

$x_{n,t} =$ (Fracción de material en el tamiz 1, instante inicial)

$$s_1 = 46,52 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{paradt} = 10 \text{ s}$$

$$x_{n,t+1} = x_{n,t} * 0,5348$$

$$x_{1,1} = 0,163 * 0,5348$$

$$x_{1,1} = 0,0871$$

$$x_{1,2} = 0,0871 * 0,5348$$

$$x_{1,2} = 0,0466$$

Las ecuaciones para el resto de los tamices serán:

Para $n=2$

$$x_{2,t+1} = x_{2,t}(1 - S_2 \Delta t) + \Delta t(x_{1,t} S_1 \Delta B_{2,1})$$

Para $n=3$

$$x_{3,t+1} = x_{3,t}(1 - S_3 \Delta t) + \Delta t(x_{1,t} S_1 \Delta B_{3,1} + x_{2,t} S_2 \Delta B_{3,2})$$

Para $n=4$

$$x_{4,t+1} = x_{4,t}(1 - S_4 \Delta t) + \Delta t(x_{1,t} S_1 \Delta B_{4,1} + x_{2,t} S_2 \Delta B_{4,2} + x_{3,t} S_3 \Delta B_{4,3})$$

Y resolviendo las ecuaciones para los tiempos de 0 a 60 tenemos que las composiciones en los tamices en los intervalos establecidos será:

Tabla 3 3.2.5.2-1 Simulación de molienda para los diferentes tamices en los diferentes tiempos

<i>Nº</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x4</i>
1	0	0,4500	0,3100	0,1500	0,0900
2	0,1	0,1989	0,3118	0,2364	0,1665
3	0,2	0,0879	0,2433	0,2930	0,2224
4	0,3	0,0389	0,2131	0,3256	0,2610
5	0,4	0,0172	0,1997	0,3472	0,2920
6	0,5	0,0076	0,1938	0,3638	0,3196
7	0,6	0,0034	0,1912	0,3778	0,3456
8	0,7	0,0015	0,1900	0,3905	0,3709
9	0,8	0,0007	0,1895	0,4022	0,3957
10	0,9	0,0003	0,1893	0,4133	0,4203

Gráficamente la tabla realizada se la puede representar de la siguiente manera:

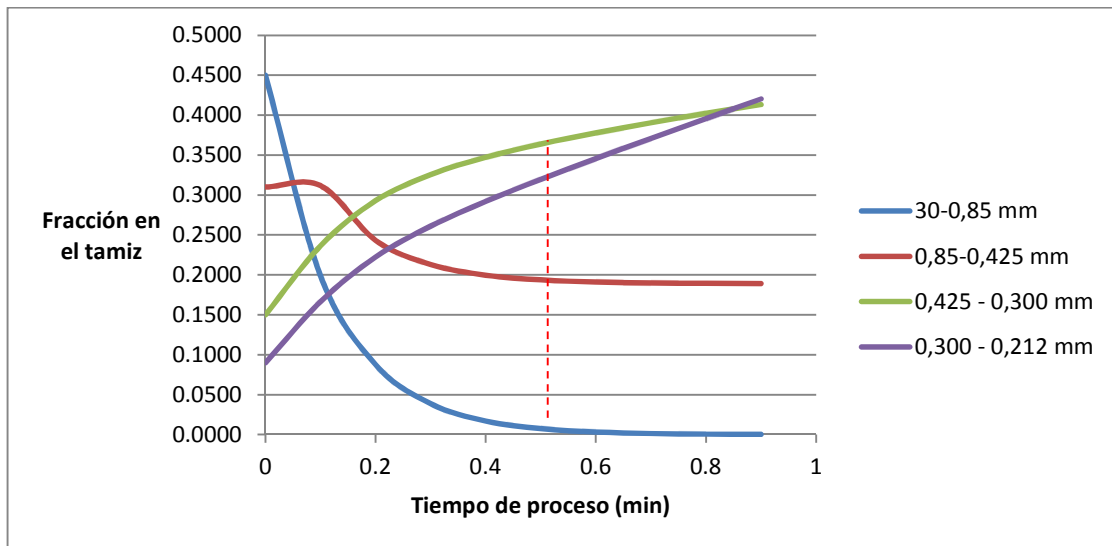


Fig. 3.2.5.2-1 Comportamiento de molienda de yeso sobre los tamices en diferentes tiempos de proceso

Como se indica en la figura las fracciones de yeso en un tiempo inicial 0 son diferentes en un rango de varios diámetros.

Las fracciones más gruesas (Línea color azul) descienden rápidamente su diámetro, hasta que aproximadamente a un tiempo de entre 0,5 y 0,6 min ya no se encuentra fracción de material para moler entre esos diámetros.

Las fracciones medias de 0,85 y 0,425 mm (Línea de color rojo) crecen un instante, que en teoría y acorde con los modelos matemáticos, son debidos a las fracciones que se generaron en el grupo de tamices anteriores. Pero en un tiempo antes de 0,2 min estos empiezan a decrecer rápidamente hasta un tiempo de 0,4 min, a partir de la cual su fracción sobre los tamices se vuelve casi constante o su decrecimiento es leve.

Las fracciones bajas entre 0,425 y ,0300 mm (Línea color verde) tiene una tendencia de crecimiento, pero según el análisis del gráfico en un tiempo de 0,80 min esta curva pasa a parecer constante.

Las fracciones finas de 0,300 a ,0212 mm (Línea color violeta) tienden a aumentar con respecto en el tiempo de manera aproximadamente lineal.

3.1.6. CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA

Consideramos al sistema de molienda y tamizado como uno solo, podemos asegurar lo siguiente:

$$A = B + C$$

Donde:

A= Masa de yeso que entra al sistema de molienda y tamizado (g)

B= Masa de yeso que sale del sistema de molienda y tamizado (g)

C= Masa de yeso que se retiene dentro del sistema de molienda y tamizado (g)

Si conocemos estos valores podemos determinar el porcentaje de yeso que ha sido procesado con el molino empleado, mediante la siguiente ecuación:

$$e_{mt} = \frac{B}{A + C} \times 100$$

Donde:

e_{mt} = Eficiencia del proceso de molienda y tamizado combinado.

$$e_{mt} = \frac{955}{1000} \times 100$$

$$e_{mt} = 95.5\%$$

3.2.DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL EQUIPO.

3.2.1. DISEÑO DE LA CARCASA DEL MOLINO

3.2.1.1.CÁLCULO DEL VOLUMEN APLICADO POR CARGA DE YESO AL MOLINO.

En base a datos de la tabla **Tabla 2.3.2.-1** podemos establecer el volumen que ocupan las cargas de yeso dentro del molino. El volumen a ocupar del yeso en una carga estará regido por la ecuación que describe su densidad aparente, y esta es:

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_{ay}}$$

Donde:

m_c = Masa de la carga (g)

ρ_{ay} = Densidad aparente del yeso (g/cm³)

V_c = Volumen de la carga (cm³)

Puesto que se ha elegido una carga de 2,50 kg, tendríamos que en cada carga el volumen ocupado por el yeso es:

$$V_c = \frac{2500}{1,41}$$

$$V_c = 1773,05 \text{ cm}^3$$

3.2.1.2.CALCULO DEL VOLUMEN DEL EQUIPO (CARCASA)

De acuerdo a los ensayos realizados en el prototipo de molino, el exceso de material en el equipo produce cavitaciones y no permite el arranque adecuado del motor, y el llenado del molino no debe exceder el 35% del volumen total del equipo, tomando en cuenta esta consideración tenemos, pero para este caso tomaremos en cuenta un 30% de llenado del molino:

$$V_e = \frac{V_c}{\%llenado} \times 100$$

$$V_e = \frac{1773,05}{30} \times 100$$

$$V_e = 5910,17 \text{ cm}^3$$

3.2.1.3.CALCULO DE DIMENSIONES DEL MOLINO (CARCASA)

Considerando a la carcasa del molino con un cilindro, podemos aplicar el siguiente cálculo:

$$V_c = \pi \times r_c^2 \times l_c$$

Donde

V_c= volumen de la carcasa del molino (cm³).

r_c= Radio de la carcasa (cm)

l_c= Longitud de la carcasa del molino (cm)

Suponiendo un valor de r= 13,5cm, tendríamos:

$$l_c = \frac{V_c}{\pi \times r_c^2}$$

$$l_c = \frac{5910,17}{\pi \times (13,5)^2}$$

$$l_c = 10,3 \text{ cm}$$

3.2.2. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE MARTILLOS

3.2.2.1. Cálculo de la masa de los martillos:

Los martillos a utilizar tendrán las siguientes dimensiones, de acuerdo a la figura que muestra:



Fig. 3.2.2.1-1 Martillo diseñado para molino

e_m = espesor del martillo: 0,3cm

h_m = altura del martillo: 8,0 cm

l_m = longitud del martillo: 4,0 cm

d_m = diámetro de abertura para el tren de martillo: 1,0 cm

Considerando estos parámetros determinamos el volumen total del martillo que viene dada por la ecuación siguiente:

$$V_{total} = V_{martillo} - V_{abertura\ para\ el\ tren}$$

Para calcular $V_{martillo}$ se considera que el martillo no tiene una perforación en la parte inferior.

$$V_{martillo} = e \times h \times l$$

$$V_{martillo} = 0,3 \times 8 \times 4$$

$$V_{martillo} = 9,6\ cm^3$$

Para determinar el volumen que ocupa la abertura para el tren del martillo aplicamos la siguiente ecuación:

$$V_{abertura\ para\ el\ tren} = \pi \times e \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$V_{abertura\ para\ el\ tren} = \pi \times 0,38 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

$$V_{abertura\ para\ el\ tren} = 0,298\ cm^3$$

Entonces el volumen total del martillo será:

$$V_{total} = V_{martillo} - V_{abertura\ para\ el\ tren}$$

$$V_{total} = 9,98 - 0,298$$

$$V_{total} = 9,68\ cm^3$$

El material adecuado para los martillos de un molino de este tipo es acero DF-2 por su gran resistencia al impacto y resistencia a la abrasividad, y conociendo su densidad podremos determinar la masa de cada martillo de la siguiente manera:

$$\rho_{\text{martillo}} = 7,80 \text{ g / cm}^3.$$

$$m_{\text{martillo}} = V_{\text{martillo}} \times \rho_{\text{martillo}}$$

$$m_{\text{martillo}} = 7,68 \times 7,8$$

$$m_{\text{martillo}} = 59,9 \text{ g} = 0,060 \text{ kg}$$

3.2.2.2.Cálculo de la velocidad tangencial de los martillos:

$$w = r * \omega_m$$

Donde:

w_{mt} = velocidad tangencial del molino (m/s).

r_m = radio entre la punta del martillo y el centro del eje del molino (m).

ω_m = velocidad angular de los martillos (rad/s)

Para nuestro caso seleccionamos una velocidad de 2112 rpm que haciendo un cambio de unidades tenemos:

$$\omega = \frac{2112 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{2 \cdot \pi \cdot \text{rad}}{1 \text{ rev}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 221,2 \text{ rad/s}$$

Entonces la velocidad tangencial será:

$$w = 0,116 \cdot 221,2$$

$$w = 25,7 \text{ m/s}$$

3.2.2.3.Cálculo del factor f:

Determinamos interpolando datos de la siguiente tabla:

Tabla 3.2.2.3-1 Valores del factor f

<u>velocidad</u> <u>tangencial</u>	<u>factor f</u>
17	0,0220
20	0,0160
23	0,0100
26	0,0080
30	0,0030
40	0,0015

Mediante linealización de los datos tabulados del factor f tenemos que con un valor de

w=25,7 el factor f calculado es 0,0104

3.2.2.4. Calculo del número de martillos:

$$P_{motor} = \frac{G \times r^2 \times n^3 \times e \times f}{8 \times 100000 \times n}$$

Donde:

G = peso del martillo en kg

r= Radio que describe el martillo en el molino en m.

n= número de vueltas por minuto del rotor.

e= número de martillos

f= factor dependiente de velocidad de rotación de los martillos, según tabla

n_m= Eficiencia mecánica del motor. Asumida(0,7)

Despejando e, tenemos:

$$e = \frac{N \times 8 \times 100000 \times n}{G \times r^2 \times n^3 \times f}$$

$$e = \frac{1 \times 8 \times 100000 \times 0,7}{0,07243 \times 0,116^2 \times 2500^3 \times 0,0104}$$

$$e = 17,6 \text{ martillos}$$

En este caso utilizaremos no 18 martillos si no 20 de las cuales tendremos 5 martillos en cada tren.

3.2.3. DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DEL EJE DEL MOLINO.

3.2.3.1.CALCULO DE LA TORSIÓN EJERCIDA POR EL MOTOR DEL MOLINO:

$$T_{motor} = \frac{P \times 100}{2 \times \pi \times f \times g}$$

Donde:

T_{motor} = Momento de torsión aplicado al molino (N.m)

P_{motor} = Potencia del motor (W)

v_m = Velocidad lineal del molino (rev/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Datos:

$T_{motor} = ?$

$P_{motor} = 3hp, 2,23kW$

$f = 2112 \text{ rpm}, 35,2 \text{ rev/s}$

$$T_{motor} = \frac{2,24 \times 10^3 \times 100}{2 \times 3,1416 \times 35,2 \times 9,8}$$

$$T_{motor} = 103,3 \text{ kg.m}$$

3.2.3.2.CALCULO DEL DIAMETRO DEL EJE BASADO EN LA RESISTENCIA A LA TORSION DEL EJE

La torsión máxima resistida viene dada por la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt[3]{\left(\frac{32 \times \eta}{\pi \times S_y} \times \sqrt{M^2 + T^2}\right)}$$

Donde:

d= diámetro de eje (mm)

T_{motor}= momento de torsión ejercida por el motor al molino (N.m)

S_y = torsión máxima resistida por el material (N/m²).

$$d = \sqrt[3]{\left(\frac{32 \times 10}{\pi \times 7000} \times \sqrt{103.3^2}\right)}$$

$$d = 1,14 \text{ cm}$$

3.2.4. TOLVA DE ALIMENTACIÓN.

La tolva de alimentación tendrá la siguiente geometría:

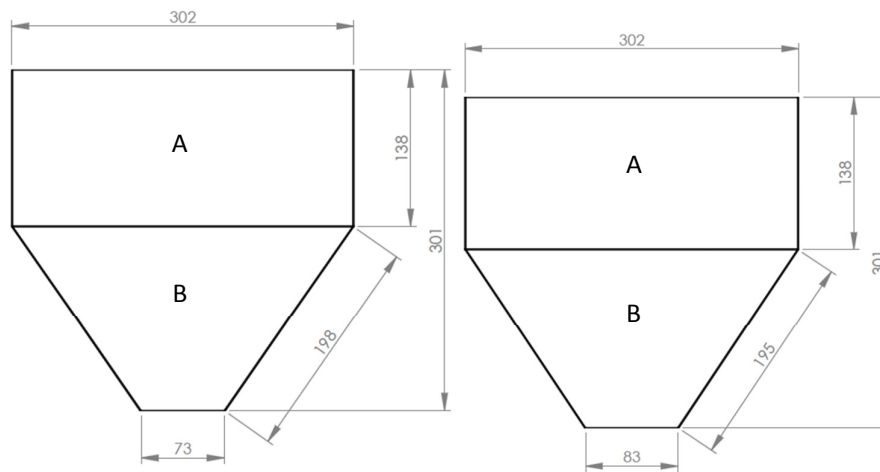


Fig. 3.2.4-1 Esquema de la tolva de alimentación

El volumen total de la tolva:

$$V_T = V_A + V_B$$

V_A corresponde al volumen de un cubo,

$$V_A = b \times a \times h$$

Donde:

$$b = 30,2 \text{ cm}$$

$$a = 30,2 \text{ cm}$$

$$h = 13,8 \text{ cm}$$

$$V_A = 30,2 \times 30,2 \times 13,8 \times \frac{1}{1000}$$

$$V_A = 12,87 \text{ L}$$

V_B corresponde al volumen de un tronco de pirámide,

$$V_B = \frac{h}{3} (A_{B1} + A_{B2} + \sqrt{A_{B1} \times A_{B2}})$$

$$A_{B1} = 912 \text{ cm}^2$$

$$A_{B2} = 60.6 \text{ cm}^2$$

$$h = 16,3 \text{ cm}$$

$$V_B = \frac{16,3}{3} (912 + 60.6 + \sqrt{912 \times 60.6})$$

$$V_B = 6,56 \text{ L}$$

El volumen total de la tolva de alimentación será:

$$V_T = V_A + V_B$$

$$V_T = 12,87 + 6,56$$

$$V_T = 19,43 \text{ L}$$

Considerando la densidad aparente del yeso tenemos que la carga de la tolva de alimentación será:

$$V_{Tolva} = \frac{m_{yeso}}{\rho_{ayeso}}$$

Donde:

$$m_{yeso} = ?$$

$$\rho_{ayeso} = 1.41 \text{ kg/L}$$

$$V_{Tolva} = 19,43 \text{ L}$$

$$V_{Tolva} = \frac{m_{yeso}}{\rho_{ayeso}}$$

$$m_{yeso} = V_{Tolva} \times \rho_{ayeso}$$

$$m_{yeso} = 19,43 \times 1,41$$

$$m_{yeso} = 27,40 \text{ kg}$$

3.3.DETERMINACION DEL TIPO DE MATERIAL PARA LA CONSTRUCCION Y MECANISMOS DE CONTROL.

3.3.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE LOS MARTILLOS PARA ELEGIR MATERIAL DE SEGURIDAD:

3.3.1.1.DETERMINACION DE AREA DE IMPACTO DEL MARTILLO

El martillo tiene la siguiente estructura:

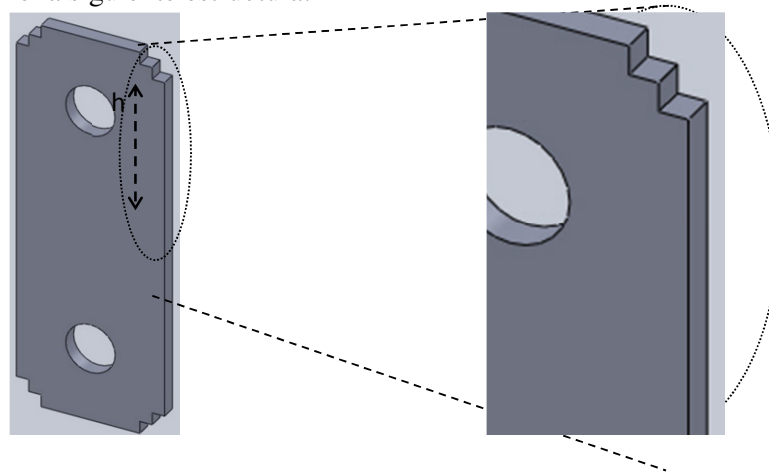


Fig. 4 3.2.1.1-1 Área de exposición el impacto en el martillo

$$h=40,0 \text{ mm}$$

$$e= 3,0 \text{ mm}$$

$$A_c= h \times e \times 2 = 35 \times 2 = \underline{80 \text{ mm}^2}$$

3.3.1.2.DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD DEL MARTILLO DEL MOLINO

Se procederá a evaluar la resistencia a la compresión de los martillos actuales, para determinar si son aptos para el trabajo del molino. Para esto utilizamos las siguientes expresiones:

$$\sigma_c = \frac{F_t}{A_c}$$

$$n = \frac{[\sigma_c]}{\sigma_c}$$

$$n \times \sigma_c = [\sigma_c]$$

Donde:

σ_c =Esfuerzo de compresión (kg/mm^2)

F_t = Fuerza de trituración del yeso de **40 kg**

A_c = Área sujeta a compresión (mm^2)

n_{sm} = coeficiente de seguridad de los martillos (Adimensional)

$[\sigma_c]$ =Resistencia a la compresión del martillo (kg/mm^2)

El material recomendado para fabricar los martillos de impacto es DF-2:

Datos:

$$\sigma_c = ? \text{ kg/mm}^2$$

$$F_t = 560 \text{ kg (En 14 martillos)}$$

$$A_c = 140 \text{ mm}^2$$

$$n = ?$$

$$[\sigma_c] = 310,00 \text{ kg/mm}^2 \text{ (Acero D-F2)}$$

Resolviendo las ecuaciones tenemos:

$$\sigma_c = 4,00 \text{ kg/mm}^2$$

$$n = 77,50$$

Se verifica que $n=77,50$ es ideal para este tipo de máquinas.

3.3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

De acuerdo a los cálculos expuestos anteriormente se determinaron los siguientes materiales para la construcción del equipo:

Tabla 3.3.2-1 Materiales para la construcción del equipo.

Parte del equipo	Material seleccionado	Justificación
Martillos.	Acero DF-2	Alta resistencia a la compresión, al impacto y a la abrasión. Alta resistencia mecánica.
Eje de transmisión y trenes.	Acero de transmisión	Buena resistencia a la torsión
Rodetes y carcasa.	Acero AISI 304	Buena resistencia a la corrosión y contaminación producida por sales, buena resistencia al impacto y desgaste.
Tolvas de alimentación y de descarga.	Acero AISI 430	Buena resistencia al desgaste, larga vida útil, resistente a atmósferas agresivas.
Soporte del molino.	Hierro	Económico, no requiere elevadas propiedades mecánicas para la función a desempeñar.
Poleas.	Aluminio	Resistencia a la corrosión, bajo peso, elevada tracción con la banda y no produce desgaste de la misma.

3.3.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA ELECTRICO

El sistema eléctrico del equipo consta de las siguientes partes:

Tabla 3.3.3 -1 Materiales para el sistema eléctrico del equipo

Descripción	Justificación/Función
Contactor-Pulsador	Dispositivo para encender y apagar el equipo con resistencia a 30 Amperios
Relé térmico	Dispositivo electrónico que permite el apagado del equipo cuando se produce sobrecarga eléctrica.
Cable cilíndrico 2x10	Permite resistencia a elevadas tensiones eléctricas.

3.4.REQUERIMIENTO PRESUPUESTARIO

3.4.1. RECURSOS HUMANOS

Tabla 4 3.4.1-1 RECURSOS HUMANOS

DENOMINACIÓN	COSTO (\$)
Diseño de equipo.	200
Mano de obra para	525

construcción de equipo.	
SUBTOTAL	725

Fuente: Tesistas

3.4.2. RECURSOS MATERIALES

Tabla 5 3.5.2-1 RECURSOS MATERIALES PARA DISEÑO DE EQUIPO

DENOMINACIÓN	COSTO (\$)
Materiales y suministro de oficina.	55
Equipo para pruebas.	200
Reactivos de laboratorio para caracterización de yeso molido.	50
SUBTOTAL	305

Fuente: Tesistas

Tabla 6 3.5.2-2 RECURSOS MATERIALES CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO

DENOMINACIÓN	COSTO (\$)
Materiales para construcción del equipo.	1279,5
SUBTOTAL	1279,5

Fuente: Tesistas

Tabla 7 3.5.2-3 GASTOS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

DENOMINACIÓN	COSTO (\$)
Mantenimiento eléctrico (Limpieza y revisión del contactor y motor)	30
Mantenimiento mecánico (limpieza y lubricación de rodamientos)	10
Mantenimiento de cámara de molienda (limpieza y cambios de posición de martillos)	20
SUBTOTAL	60

Fuente: Tesistas

Tabla 3.5.2-4 TOTAL RECURSOS MATERIALES

DENOMINACIÓN	COSTO (\$)
Recursos materiales para diseño de equipo	305
Recursos materiales para construcción de equipo	1279,5
Gastos de operación del equipo	60

SUBTOTAL	1644,5
-----------------	---------------

Fuente: Tesistas

3.4.3. RECURSOS TOTALES

**Tabla 3.4.3.1-1 RECURSOS TOTALES PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
DE EQUIPO**

DENOMINACIÓN	COSTO (\$)
Recursos humanos	725
Recursos materiales	1644,5
Subtotal:	2369,5
Imprevistos (10%)	237
TOTAL	2606,5

Fuente: Tesistas

3.4.4. MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

**Tabla 83.4.4-1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL
EQUIPO**

DENOMINACIÓN	TIPO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO TOTAL (\$)
Lámina para carcaza izquierda y derecha	Acero AISI 304	2	80	160
Eje del molino	Acero de Transmisión AISI 4140	1	60	60
Martillos	Acero DF-2	20	9	180
Separadores de martillos	Acero AISI 304	24	0,5	12
Tolva de alimentación	Acero AISI 430	1	60	60
Tolva de descarga	Acero AISI 430	1	40	40
Soporte del molino	Hierro	1	40	40
Tapa de la carcasa del molino	Acero AISI 304	1	70	70
Trenes de martillos	Acero de Transmisión	4	30	120
Disco 1 del molino (Forma circular)	Acero AISI 304	1	60	60
Disco 2 del molino (Forma rectangular)	Acero AISI 304	1	50	50
Pernos y tuercas	Hierro	10	0,25	2,5
Polea del molino	Aluminio (12cm diámetro)	1	20	20
Polea de caracol del motor	Aluminio (3, 6 y 8 cm de diámetro)	1	12	12
Banda de trasmisión		1	3	3
Motor eléctrico	3 hp de 3500 rpm	1	300	300
Sistema de eléctrico	Contactor-pulsador con relé térmico	1	90	90
TOTAL				1280

Tabla 3.4.4-2 Material de construcción del prototipo de molino.

Estructura	Material de construcción
Carcasa	Hierro forjado al 0,10% de Carbono
Eje	Acero de transmisión
Martillos	Hierro forjado al 0,10% de Carbono
Base	Fundición gris con grafito en láminas
Poleas	Aluminio

Fuente: Tesistas.

3.4.5. Dimensionamiento del molino de martillos

Tabla 3.4.5-1 Dimensionamiento del molino de martillos.

Sección del molino	Característica	Unidad	Valor
Motor eléctrico	Potencia de trabajo	HP	3
		kw	2,2
Sistema de transmisión	Velocidades tangenciales	rpm	3400
		rpm	2500
		rpm	2000
	Diámetros de poleas motor	mm	26,0
		mm	53,0
		mm	80,0
	Diámetro polea del molinete	mm	100,0
Carcasa	Diámetro interno	mm	288,0
	Longitud interna	m	123,0
	Espesor	mm	6,0
Martillos	Nº de martillos	unidades	20,0
	Espesor	mm	3,0
	Longitud	mm	80,0
	Ancho	mm	35,0
Eje	Diámetro	mm	30,0
	Longitud	mm	145,0
Tamiz	Diámetro del agujero	mm	1,0
	Espacio entre agujeros	mm	3,0
	Área de la placa	mm ²	58000
Tolva de Alimentación	Capacidad	l	19,4

Fuente: Tesistas.

3.5.RESULTADOS DE MOLIENDA EN EQUIPO DISEÑADO Y CONSTRUIDO

Ensayo # 1

Tabla 9 3.5-1 Resultados de molienda con igual diámetro de alimentación pero a diferentes velocidades

N° de prueba	$\varphi_i(cm)$	Velocidad (rpm)	Apertura de malla μm									Total acumulado	% Retenidos tamiz 212 μm
			850 μm	425 μm	300 μm	212 μm	150 μm	106 μm	53 μm	38 μm	< 38 μm		
1	3,0	1520,0	0,15	6,36	12,50	14,36	10,37	8,90	13,40	10,49	23,47	100,00	33,37
2	3,0	1774,0	0,12	6,42	9,12	13,49	11,08	7,89	12,78	11,20	27,90	100,00	29,15
3	3,0	2112,0	0,44	6,80	7,74	12,49	8,30	10,93	14,50	12,80	26,00	100,00	27,47

Tabla 3.5-2 Datos acumulativos de resultados de molienda a igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades

Diámetro de alimentación	<i>Velocidad de Trabajo</i>	<i>Abertura del tamiz μm</i>								
		<u>850,00</u>	<u>425,00</u>	<u>300,00</u>	<u>212,00</u>	<u>150,00</u>	<u>106,00</u>	<u>53,00</u>	<u>38,00</u>	<u>20,00</u>
<u>3,0</u>	<u>1520,00</u>	0,15	6,51	19,01	33,37	43,74	52,64	66,04	76,53	100,00
<u>3,0</u>	<u>1774,00</u>	0,12	6,54	15,66	29,15	40,23	48,12	60,90	72,10	100,00
<u>3,0</u>	<u>2112,00</u>	0,44	7,24	14,98	27,47	35,77	46,70	61,20	74,00	100,00

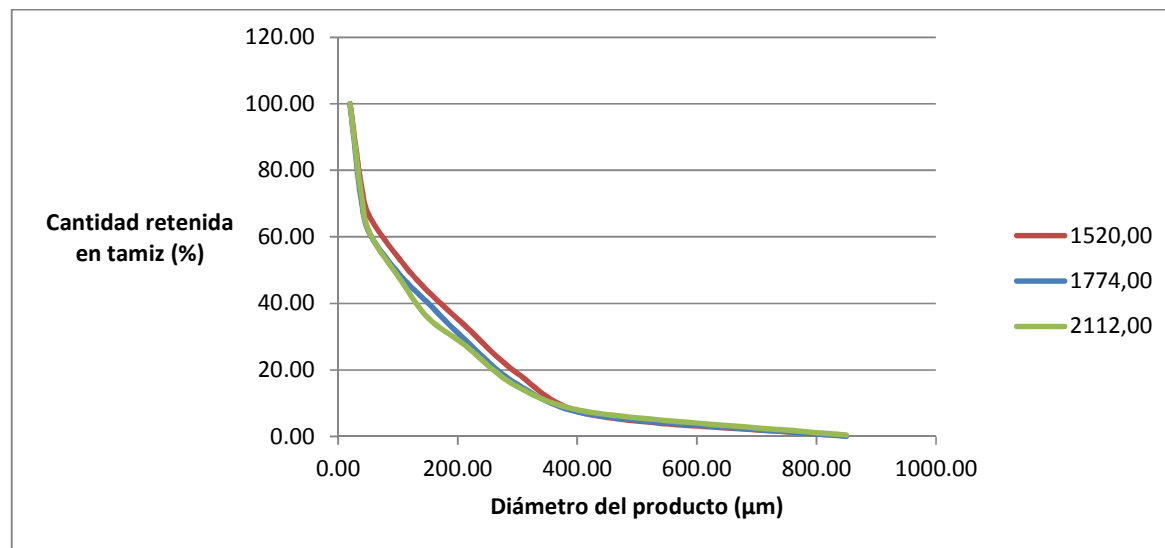


Fig. 3.5-1 Comportamiento de la molienda con igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades

Ensayo # 2

Tabla 10 3.5-3 Resultados de molienda con igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades

N° de prueba	$\varphi_i(cm)$	Velocidad (rpm)	Apertura de malla μm									Total acumulado	% Retenidos tamiz 212 μm
			850 μm	425 μm	300 μm	212 μm	150 μm	106 μm	53 μm	38 μm	< 38 μm		
1	3,0	1520,0	0,18	6,56	12,34	13,50	10,14	8,80	13,70	10,66	24,12	100,00	32,58
2	3,0	1774,0	0,23	6,89	9,14	12,40	10,78	7,34	13,43	12,55	27,24	100,00	28,66
3	3,0	2112,0	0,15	6,24	7,12	11,40	8,67	9,50	15,02	14,00	27,90	100,00	24,91

Tabla 3.5-4 Datos acumulativos de resultados de molienda de igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades.

Diámetro de alimentación	Velocidad de Trabajo	Abertura del tamiz μm								
		<u>850,00</u>	<u>425,00</u>	<u>300,00</u>	<u>212,00</u>	<u>150,00</u>	<u>106,00</u>	<u>53,00</u>	<u>38,00</u>	<u>20,00</u>
3,0	1520,00	0,18	6,74	19,08	32,58	42,72	51,52	65,22	75,88	100,00
3,0	1774,00	0,23	7,12	16,26	28,66	39,44	46,78	60,21	72,76	100,00
3,0	2112,00	0,15	6,39	13,51	24,91	33,58	43,08	58,10	72,10	100,00

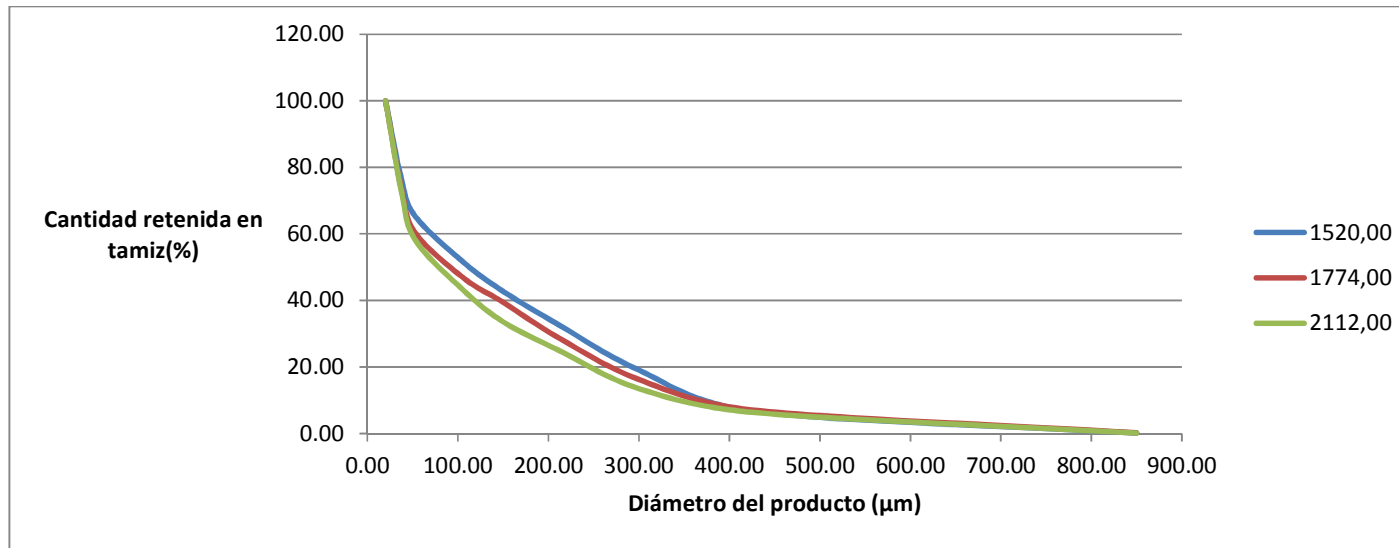


Fig. 3.5-2 Comportamiento de la molienda de yeso a igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades

Ensayo # 3

Tabla 3.5-5 Resultados de molienda de yeso con igual diámetro de alimentación y diferentes velocidad

N° de prueba	$\varphi_i(cm)$	Velocidad (rpm)	Apertura de malla μm									Total acumulado	% Retenidos tamiz 212 μm
			850 μm	425 μm	300 μm	212 μm	150 μm	106 μm	53 μm	38 μm	< 38 μm		
1	3,0	1520,0	0,20	6,14	12,50	13,97	10,42	9,34	12,98	11,66	22,79	100,00	32,81
2	3,0	1774,0	0,18	6,57	9,12	13,65	10,90	8,50	13,48	12,00	25,60	100,00	29,52
3	3,0	2112,0	0,23	6,70	7,62	12,40	8,35	10,80	15,60	12,80	25,50	100,00	26,95

Tabla 3.5-6 Datos acumulativos de resultados de molienda de igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades

Diámetro de alimentación	Velocidad de Trabajo	Abertura del tamiz μm								
		<u>850,00</u>	<u>425,00</u>	<u>300,00</u>	<u>212,00</u>	<u>150,00</u>	<u>106,00</u>	<u>53,00</u>	<u>38,00</u>	<u>20,00</u>
3,0	1520,00	0,20	6,34	18,84	32,81	43,23	52,57	65,55	77,21	100,00
3,0	1774,00	0,18	6,75	15,87	29,52	40,42	48,92	62,40	74,40	100,00
3,0	2112,00	0,23	6,93	14,55	26,95	35,30	46,10	61,70	74,50	100,00

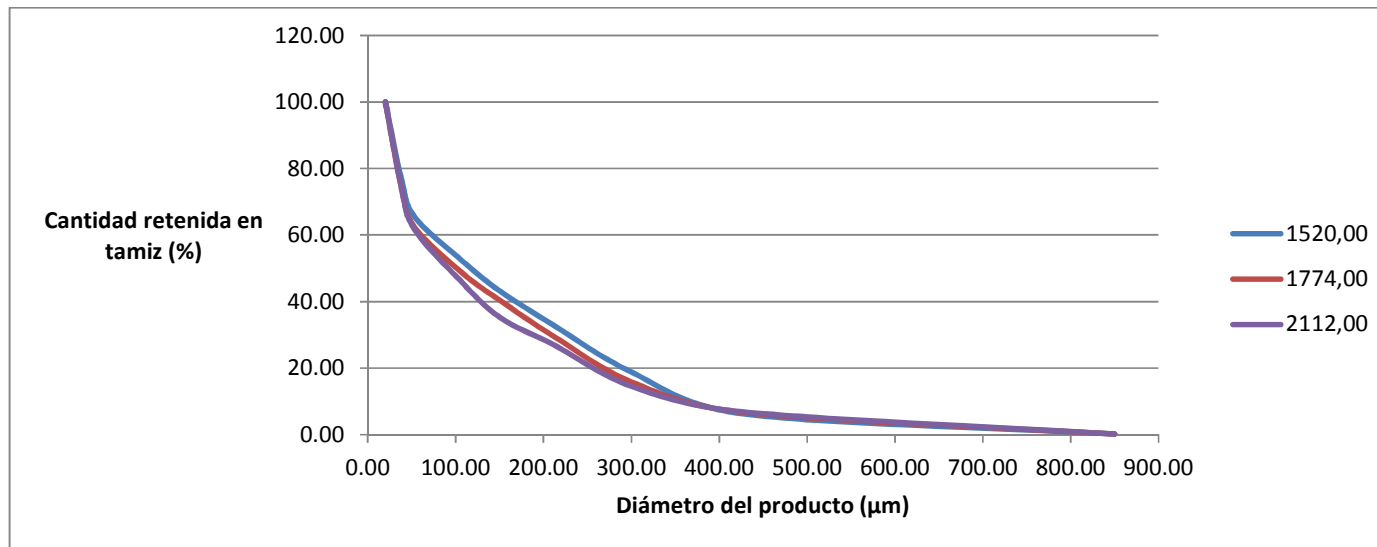


Tabla 3.5-3 Comportamiento de la molienda de yeso a igual diámetro de alimentación pero con diferentes velocidades

3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El yeso se ha convertido en un elemento imprescindible principalmente en la industria de la construcción, pero su uso se encuentra condicionado al tamaño de partícula que presente, según la Norma Técnica INEN 1688 es aceptable como yeso de construcción tipo II si presenta una granulometría de $212\mu\text{m}$, el fraguado del yeso depende de las características propias del mineral, para los ensayos se utilizó material proveniente de nombre de la provincia de Santa Elena y de la provincia de Loja, dos de los principales proveedores de yeso en el país; esta materia prima se caracterizó por presentar una calidad aceptable en sus propiedades físicas y químicas así: contaminantes comunes como Cloruro de Sodio en porcentajes inferiores al 1.0 %, y de alta pureza en sulfato de calcio con rangos mayores al 83% como se indican en la Tabla 2.3.2.1-2.

El proceso de reducción de tamaño se centró en el fraccionamiento por impacto de las muestras de yeso en un molino de martillos de 3hp a 2112 rpm, con lo que se pudo transformar la muestra de un tamaño inicial de 30mm hasta que el 72,53% del producto obtenido pasaba a través de una malla de $212\mu\text{m}$, en tiempos relativamente cortos: 30 segundos para pulverizar una muestra de 2000 g, en este molino se observó que la emisión de polvos es directamente proporcional a la velocidad a la que giran internamente los martillos. El molino consta de un sistema de transmisión por poleas y bandas, que nos permite trabajar con tres velocidades diferentes, estas son:

Los análisis y cálculos realizados sobre el proceso de molienda permitieron determinar las condiciones y variables óptimas de proceso: un volumen de llenado de 30% volumen libre del equipo, una velocidad de alimentación de 1kg/min, con un diámetro de

alimentación de 3cm a la entrada del proceso, con una velocidad de rotación angular en el eje del molino de 2500 rpm. Con las características anteriormente señaladas se obtiene un yeso de construcción de buenas características, una granulometría. Para este proceso el molino tiene un rendimiento de 95,5%, este rendimiento es bastante alto en comparación a otros equipos de molienda de características similares, esta cualidad indica eficiencia en el proceso.

Dado que la operación de reducción de tamaño se complementa con la del tamizado, fue necesario incorporar un sistema de cribado a la descarga del molino a fin de asegurar la granulometría deseada para el yeso. El estudio del sistema de molienda está orientado a la optimización de recursos y de energía.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño y construcción de un molino de martillos en Acero Inoxidable de 30cm de diámetro y 13,5 cm de ancho con una capacidad de 136 kg/h cuya eficiencia de molienda es del 95,5% del producto molido pasa por un tamiz de 1000 μm y con la mayor velocidad es posible obtener una cantidad mayor al 75,09% que pasan a través del tamiz de 212 μm .
- Se Realizó la caracterización del yeso como materia prima para la molienda el mismo que para las mejores condiciones de molienda debe ser humedad menor al 15% , impurezas menor al 4%
- De las pruebas de simulación realizadas en el molino prototipo se concluyó que la finura del yeso molido y que el trabajo del equipo en general fue directamente proporcional a 3 aspectos que se consideraron en el diseño de ingeniería, siendo éstos: la velocidad de rotación del molinete igual a 2112 rpm, el diámetro del material en la alimentación, siendo esta inferior a 30 mm, y el porcentaje de llenado de la cámara de molienda, con un valor que no exceda el 30%.
- Se realizó el diseño de un molino de martillos para pulverizar yeso crudo tomando en consideración datos obtenidos en un molino de prueba, modelos matemáticos característicos para este tipo de sistema y modelos de diseño de

máquinas que nos permitieron el diseño la estructura del equipo, también el diseño se complementó con una simulación asistida por ordenador para comprobar la resistencia de los componentes del equipo al trabajo de molienda del yeso crudo.

- La construcción del molino de martillos se realizó en acero inoxidable 304 y 430 material resistente a la corrosión, abrasión e impacto indicado para diversos usos, en la fabricación de el eje y los trenes se empleó acero de transmisión cuyo límite de flexión es mayor que la flexión proporcionada por el trabajo, de esta forma se aseguró la versatilidad en el uso del molino pudiendo emplearlo en la molienda de alimentos como también en moliendas de materiales duros.
- Se realizó las pruebas de arranque en el equipo construido y se determinó que los resultados en el nuevo equipo eran superiores a los obtenidos en el equipo prototipo de martillos en las pruebas de diseño en un 40%

4.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear yeso que tenga bajo contenido de cloruro de sodio ya que este componente lo hace más abrasivo y hace que la molienda sea agresiva al equipo y el desgaste de los martillos sea más rápida, así mismo el resto de componentes como eje, trenes y discos del molino.
- Para evitar problemas de cavitación del equipo es necesario que cuando se esté alimentando el equipo, el llenado del equipo no exceda el 30% de la capacidad volumétrica interna.
- Por razones de diseño el material que ingrese al equipo no debe exceder un diámetro de 3.0 cm, ya que excediendo este valor producirá taponamiento en la entrada y no permitirá el paso del material restante y permiten que la energía para la molienda sea menor y el rendimiento al final del proceso sea mayor.
- Se recomienda emplear la más alta velocidad en el proceso de molienda, ya que a esta velocidad se puede obtener yeso pulverizado con características que son aceptadas por la Norma Técnica INEN 1685 y la producción de polvos livianos es menor al final del proceso.
- Se recomienda que se siga el plan de mantenimiento establecido en el anexo I, a fin de prolongar la vida útil del equipo y poder obtener siempre yeso de buena calidad y siempre en el máximo rendimiento establecido.

- Para un manejo adecuado del molino se recomienda emplear la guía de operación del equipo indicada en el Anexo I para el arranque del equipo e instalación del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AUSTIN/CONCHA**, Diseño y Simulación de circuitos de Molienda y Clasificación, Concepción-Chile, 1994, Pp 123-130.
2. **BROWN G.**, Operaciones Básicas de la Ingeniería Química, Madrid-España Marín S.A., 1965, Pp 98,150,203
3. **COULSON/RICHARDSON**, Chemical Engineering, 5a ed., Oxford-Canada, Butterworth/Heinemann, 2002, Pp 106-134.
4. **MC CABE/SMITH**, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 6a. ed. México DF- México, Mc Graw Hill, 2002, Pp 890,903.914-919
5. **NORTON. R.**, Diseño de máquinas, México DF- México, Prentice Hall, 1999, Pp 230-245.
6. **PERRY. R/GREEN**, Manual del Ingeniero Químico, 7a. ed. Madrid-España, Mc Graw Hill, 2007,Pp 20-120,51.
7. **SHIGLEY, J.** Diseño de Elementos de Máquina, 5a. ed. México DF- México, Mc Graw Hill, 1992, Pp 70-79.
8. **INEN**, 1986, Norma Técnica 154, “Tamices de ensayos. Dimensiones nominales de las aberturas”, Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, Quito-Ecuador Pp 2.
9. **INEN** 1989, Norma Técnica 1685, “Yeso para construcción. Requisitos”, Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, Quito-Ecuador, Pp 1-4

- 10. BOHMAN I**, Catálogo de Aceros para Trabajo en Frío, 4a ed. editorial México DF- México 2009. Pp 120,55,78
- 11. ESTRELLA J, FONSECA B**, 2009, Repotenciación, construcción, Montaje y Pruebas de una planta de balanceado de la comunica valle Anzú Provincia de Pastaza, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Riobamba-Ecuador TESIS 2009, Pp 59-65.
- 12. GAVILANES F.**, Diseño de equipos para el procesamiento de la Papa China, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Riobamba-Ecuador TESIS 2009, Pp 163-168.

BIBLIOGRAFÍA INTERNET

13. CARACTERÍSTICAS FÍSICA Y QUÍMICAS DEL YESO

<http://es.wikipedia.org/wiki/Molino>

2011-08-26

14. EQUIPOS UTILIZADOS PARA MOLER EL YESO

<http://www.trituradora-de-piedra.com/solucion/molienda>.

2011-09-02

15. NORMA TÉCNICA DEL YESO

www.atedy.es

2011-08-25

16. YESO

http://www.cortalamina.com/espanol/menu1/trat_granos/molino.html

2011-08-26

17. YESO Y CARACTERÍSTICAS FÍSICA Y QUÍMICAS

BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA

- (1) **COULSON/RICHARDSON**, Chemical Engineering, 5a ed., Oxford-Canada, Butterworth/Heinemann, 2002, Pp 106-134.
- (2) **AUSTIN/CONCHA**, Diseño y Simulación de circuitos de Molienda y Clasificación, Concepción-Chile, 1994, Pp 123-130.
- (3) **MC CABE/SMITH**, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 4a ed., Madrid-España, Mc Graw Hill/Interamericana de España, 1998, Pp 914-919.
- (4) **NORTON, R.**, Diseño de máquinas, México DF- México. Prentice Hall, 1999, Pp 230-245.
- (5) **SINGER/PYTEL**, Resistencia de materiales Introducción a la mecánica de sólidos, 4a ed., México DF- México, Harla, 1994, Pp 60-71.
- (6) **ESTRELLA J, FONSECA B**, 2009, Repotenciación, construcción, Montaje y Pruebas de una planta de balanceado de la comunica valle Anzú Provincia de Pastaza, Facultad de Mecánica, Escuela de IngenieríaMecánica, Riobamba-Ecuador TESIS 2009, Pp 59-65.
- (7) **GAVILANES F.**, Diseño de equipos para el procesamiento de la Papa China, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Riobamba-Ecuador TESIS 2009, Pp 163-168.

ANEXOS

ANEXO I

GUIA DE OPERACIÓN, SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO DEL MOLINO DE MARTILLOS

El siguiente documento es una guía de operación del equipo para molienda de yeso crudo.

Instalación del equipo

Previo al funcionamiento del equipo es necesario fijar el molino sobre el sitio donde va a ser su puesto de trabajo, para ello el equipo cuenta con una base con planitas agujeradas para colocar pernos de 1/4", las cuales permitirán que el equipo se fije al suelo y no se desplace de un lugar a otro cuando está en funcionamiento, esto debido a las vibraciones que se producen por las elevadas velocidades de rotación que tiene el equipo.

El equipo posee un sistema de transmisión por poleas y bandas, la cual está diseñada para trabajar con tres velocidades de rotación 1520 – 1774 – 2112 rpm, esto para permitir realizar molienda a materiales de diferentes naturaleza cuya dureza se encuentre por debajo de 2 en la escala de Mohs.

Para la regulación de la velocidad primero se debe retirar la protección del sistema de transmisión, luego será necesario desmontar el motor del molino que está sujeta por pernos y tornillos al bastidor del molino, luego se integrará la banda en el canal de la polea del motor según la velocidad a la que se vaya a trabajar (La de menor diámetro para la máxima velocidad y la de mayor diámetro para trabajar con la mínima velocidad) y finalmente se ajustará el motor al bastidor para tensionar la banda de la polea del motor con la polea del molino, y finalmente se colocará el protector del sistema de transmisión para evitar accidentes.

Por último se verificará que la parte interna del equipo se encuentre despejada y que la criba incorporada no esté averiada y que está en buen estado, también se deberá verificar que los martillos y los trenes no estén en mal estado (que no tengan fisuras o no estén desviadas, alteraciones causadas por trabajar con materiales de elevada dureza).

Seguido estos pasos el molino ya estará en condiciones de trabajar en un lugar estable y con una velocidad definida.

Arranque y apagado del equipo.

- Previo al arranque del equipo se colocará la alimentación en la tolva de alimentación tomando en consideración de que la compuerta de paso del material esté en un valor más bajo que el diámetro de entrada del material.
- Luego se tapará la compuerta del molino y se la asegurará.

- Se colocará sacos de Polipropileno a la altura de la descarga del molino para recibir el material que está cayendo.
- Luego el equipo deberá conectarse a una fuente de energía alterna de 110V. y deberá ser encendida del interruptor de seguridad.
- Una vez encendido el equipo se procederá a abrir la compuerta de alimentación para permitir el paso del material, observando que la regleta esté en valores superiores a los correspondientes diámetros de la alimentación.
- Para una carga máxima en la tolva de alimentación se emplea un tiempo de molienda de 30 segundos , luego de la cual dejará de caer material a la tolva de descarga, y se procederá a apagar el equipo desde el interruptor de seguridad.

Mantenimiento del equipo después del uso.

- Por razones de geometría interna del equipo y por naturaleza del yeso, la misma tiende a aglomerarse en los vértices del equipo, en los trenes de los martillos y en la parte frontal de todos los martillos, por lo que después de su uso en molienda se recomienda eliminar estas aglomeraciones con la ayuda de una brocha. Además de eliminar ciertos polvos adheridos a las paredes interna de la carcasa y en la salida del equipo.

Protección personal para uso de equipo.

Debido a la baja granulometría del material, el producto tiende a suspenderse en el aire cuando hay fugas en la descarga del material, por lo cual es aconsejable utilizar:

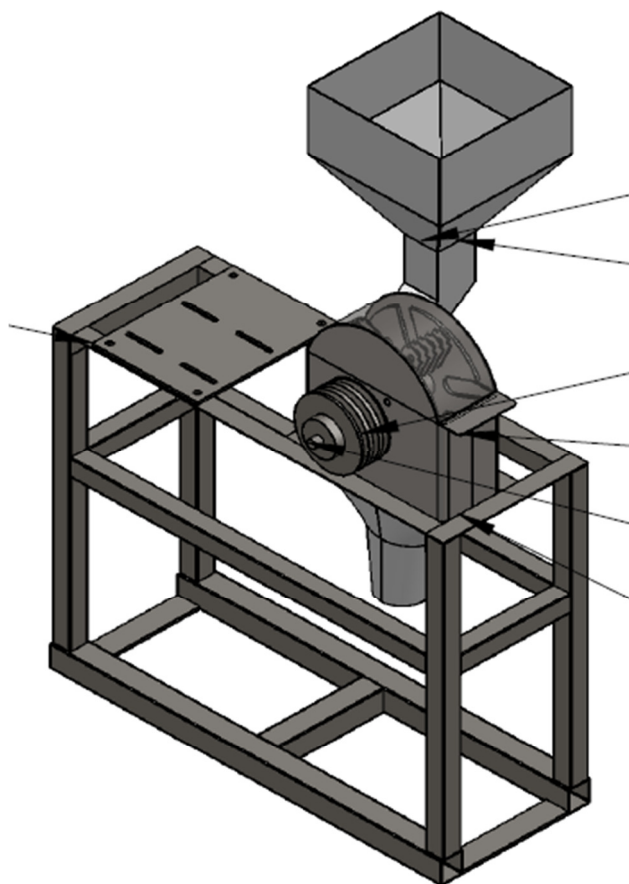
- Guantes.
- Gafas.
- Mascarilla con filtros para polvos.
- Mandil u overol.

Mantenimiento del equipo.

- La banda de transmisión tiende a desgastarse con el tiempo de uso del molino, por se recomienda cambiarla después de 400 horas de funcionamiento, a fin de disminuir perdidas de energía por fricción con las poleas.
- Los martillos fueron diseñados de tal manera que poseen 4 áreas de impacto. En dependencia con el tiempo de trabajo y la naturaleza del material a moler el área de impacto de los martillos tendrán la tendencia de desgastarse, por lo cual se deberá rotar su posición.

ANEXO II

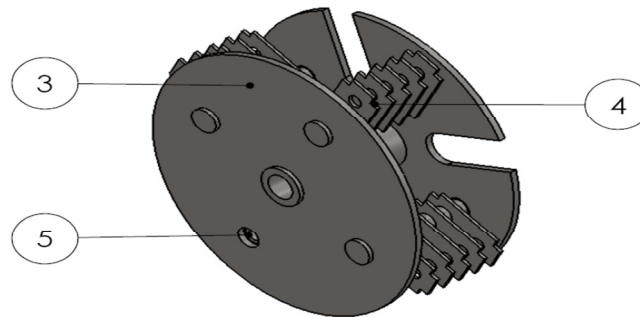
MOLINO DE MARTILLOS PROPUESTO PARA CONSTRUCCIÓN



Notas	Categoría de Diagrama	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA José Vicente Montero Vargas Luis Fernando Guayllas	Tema		
			Diseño y construcción de un Molino de matillos.		
	Certificar -Por eliminar Por aprobar -Para informar Aprobado -Por calificar		Lamina	Escala	Fecha
					2012/04/16

ANEXO III

RODETE DEL MOLINO DE MARTILLOS PROPUESTO PARA CONSTRUCCIÓN



Nº de elemento	Descripción	Cantidad
3	Rodete molino	1
4	Martillo	20
5	Separadores martillos	24

Notas	Categoría de Diagrama	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA José Vicente Montero Vargas Luis Fernando Guayllas	Tema		
	Certificar -Por eliminar Por aprobar -Para informar Aprobado -Por calificar		Diseño y construcción de un Molino de matillos.		
			Lamina	Escala	Fecha
					2012/04/16

ANEXO IV

CDU 55.666.81	INEN	CO 02.01-405
Norma Ecuatoriana Obligatoria Emergente	YESOS PARA CONSTRUCCION. REQUISITOS.	INEN 1 685 1989-02

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece los requisitos químicos y físicos de los yesos que se usan en la construcción.

2. ALCANCE

2.1 Esta norma se aplica al yeso calcinado, tal como se define en la Norma INEN 1 684.

3. TERMINOLOGIA

3.1 Para efectos de la presente norma, se aplicarán las definiciones y terminología de la Norma INEN 1 684.

4. CLASIFICACION

4.1 Los yesos de uso más corriente en la construcción pueden clasificarse en:

4.1.1 *Yeso de 1ra. (blanco)* Que provendrá de la calcinación del alabastro o piedra de yeso más pura que cumpla con los requisitos especificados en esta norma. Este yeso se empleará preferentemente en blanqueados, estucados y en general en los trabajos de acabado.

4.1.2 *Yeso de 2da. (gris).* Provenirá de la calcinación de la piedra de yeso que cumpla con los requisitos especificados en esta norma. Este yeso se empleará en la ejecución de bóvedas, tabicados, masillados, tendidos y demás trabajos que por sus características no aconsejen utilizar el yeso de 1ra.

4.1.3 *Yeso de prefabricados.* Es el yeso de construcción utilizado en la ejecución de elementos prefabricados, que cumpla con los requisitos especificados en esta norma.

4.1.4 Cada una de estas calidades, a su vez, podrán ser de fraguado rápido o lento. No se incluye en esta norma los yesos anhidros.

5. REQUISITOS QUIMICOS

5.1 **Composición.** El yeso debe estar compuesto de sulfato cálcico (CaSO_4) combinado con agua en forma cristalina, con la fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, sulfato cálcico hemihidratado.

(Continúa)

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN, Casilla 3999 - Baquerizo 454 y Ave. 6 de Diciembre - Quito-Ecuador - Prohibida la reproducción

INEN
INSTITUTO ECUATORIANO
DE NORMALIZACION
BIBLIOTECA

Notas	Categoría de Diagrama	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	Tema		
	Certificar -Por eliminar	FACULTAD DE CIENCIAS	Diseño y construcción de un Molino de matillos.		
	Por aprobar -Para informar	ESCUELA DE ING. QUIMICA			
	Aprobado -Por calificar	José Vicente Montero Vargas	Lamina	Escala	Fecha
		Luis Fernando Guayllas			2012/04/16

ANEXO V

INEN 1 685

1989-02

5.1.1 Un material se considera como yeso de construcción cuando contiene como mínimo los siguientes porcentajes de sulfato cálcico hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$).

yeso de 1ra.	80 ^o /o en masa
yeso de 2da.	75 ^o /o en masa
yeso para prefabricados	85 ^o /o en masa

6. REQUISITOS FISICOS

6.1 **Tiempo de fraguado.** En los yesos de fraguado rápido, éste empezará entre 2 y 3 minutos y terminará antes de 15 minutos, y en los yesos de fraguado lento empezará entre 5 y 15 minutos y terminará antes de 30 minutos.

6.2 **Resistencia a la compresión.** La resistencia mínima a la compresión determinada de acuerdo a la Norma INEN 1 688 será de:

Yeso de 1ra.	8 MPa (60 kgf/cm ²)
yeso de 2da.	6 MPa (60 kgf/cm ²)
yeso para prefabricados	9 MPa (90 kgf/cm ²)

6.3 **Finura.** Los porcentajes de residuos máximos que deben obtenerse y el tamiz que debe utilizarse vienen indicados a continuación:

Porcentaje de residuos en el tamiz de 212 μm (INEN 154)

yeso de 1ra.	15
yeso de 2da.	50
yeso de prefabricados	30

7. ENSAYOS

7.1 Los ensayos se realizarán de acuerdo a las Normas INEN 1687 y 1688.

8. EMPAQUETADO Y MARCADO

8.1 Los yesos a que hace referencia esta norma deberán estar secos y exentos de grumos, y se expendrán en sacos de 20 kg.

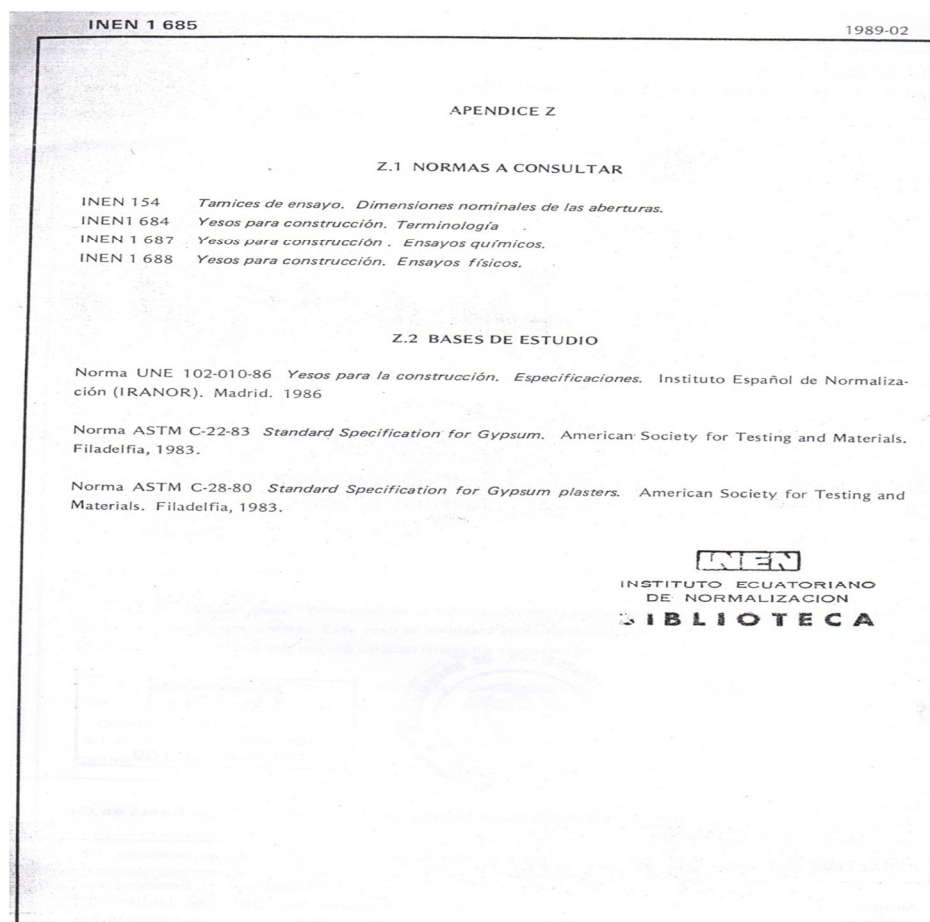
8.2 Los sacos de yeso llevarán la siguiente información, marcada en forma legible e indeleble:

- nombre del fabricante,
- descripción y calidad del material,
- masa neta.

(Continúa)

Notas	Categoría de Diagrama	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA José Vicente Montero Vargas Luis Fernando Guayllas	Tema		
	Certificar -Por eliminar		Diseño y construcción de un Molino de matillos.		
	Por aprobar -Para informar		Lamina	Escala	Fecha
	Aprobado -Por calificar				2012/04/16

ANEXO VI



Notas	Categoría de Diagrama	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUIMICA José Vicente Montero Vargas Luis Fernando Guayllas	Tema		
			Diseño y construcción de un Molino de matillos.		
	Certificar	-Por eliminar	Lamina	Escala	Fecha
	Por aprobar	-Para informar			2012/04/16
	Aprobado	-Por calificar			

